



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

# NÁVRH 3D TISKÁRNY TYPU DELTA PI S TEMPEROVANOU PODLOŽKOU S VYUŽITÍM SYSTÉMŮ CAE

DESIGN OF DELTA PI 3D PRINTER WITH TEMPERED BED USING CAE SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ KOUDELA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR VYROUBAL

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektrotechnická výroba a management**

**Student:** Bc. Ondřej Koudela

**ID:** 134338

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh 3D tiskárny typu delta pi s temperovanou podložkou s využitím systémů  
CAE**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte trendy v oblasti vývoje nekomerčních 3D tiskáren typu reprop. Nastudujte teorii FDM tisku. Seznamte se s reprop tiskárnou I3 na ústavu UETE. Navrhněte a vytvořte 3D model tiskárny typu delta pi a proveďte návrh, simulaci a optimalizaci temperované podložky.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

**Termín zadání:** 10.2.2015

**Termín odevzdání:** 28.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Vyrubal

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# **ABSTRAKT**

Předložená diplomová práce se věnuje tématice 3D tisku s využitím nekomerčních 3D tiskáren typu RepRap. V této práci je stručně popsán vývoj trendů nekomerčních RepRap tiskáren, teorie FDM tisku s rozbořem a s porovnáním materiálů používaných při tisku, problematika metody konečných objemů a teorie šíření tepla. V praktické části jsou na základě simulací z programu SolidWorks Flow Simulation diskutovány dva základní způsoby vyhřívání temperované podložky, dále teplotní profil trysky a tepelné proudění v celé sestavě tiskárny. Výstupem této práce je návrh optimalizovaného modelu a fyzická sestava 3D tiskárny typu delta pi.

# **KLÍČOVÁ SLOVA**

3D tisk, RepRap, FDM tisk, SolidWorks, Flow Simulation, delta pi, temperovaná podložka, tavící tryska

# **ABSTRACT**

This master's thesis deals with 3D printing using non-commercial 3D RepRap type printers. This work briefly describes development trends of non-commercial RepRap printers, theory of FDM print with analysis and comparison of materials, which are used in printing and the issue of the finite volume method and theory of heat diffusion. The practical part based on simulations from SolidWorks Flow Simulation discussed two basic methods of heating hot bed, then the temperature profile of hot end and the heat flow in full assembly of the printer. Outcome of this work is design an optimized model and the physical assembly of 3D printer delta pi type.

# **KEYWORDS**

3D print, RepRap, FDM print, SolidWorks, Flow Simulation, delta pi, hot bed, hot end

KOUDELA, O. *Návrh 3D tiskárny typu delta pi s temperovanou podložkou s využitím systémů CAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2014. 76 s., 40 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Vyroubal.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Návrh 3D tiskárny typu delta pi s temperovanou podložkou s využitím systémů CAE jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vyroubalovi za cenné rady a metodické vedení při vypracovávání diplomové práce. Dále chci poděkovat doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za spolupráci na technické dokumentaci konstrukčních dílů.

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xi</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 3D tisk</b>	<b>3</b>
1.1 Historie.....	3
1.2 Rapid Prototyping .....	4
1.3 Projekt RepRap .....	4
1.4 Modely RepRap tiskáren .....	5
1.4.1 Darwin .....	5
1.4.2 Mendel .....	6
1.4.3 Huxley.....	6
1.4.4 Prusa Mendel .....	7
1.4.5 MendelMax .....	8
1.4.6 Rostock Mini.....	9
<b>2 Technologie FDM tisku</b>	<b>10</b>
2.1 Princip FDM tisku .....	10
2.2 Materiály vhodné pro FDM tisk .....	11
2.2.1 ABS (akrylonitril-butadien-styren).....	11
2.2.2 PLA (polyactic acid) .....	12
2.2.3 PC (polykarbonát).....	13
<b>3 Teorie simulací</b>	<b>14</b>
3.1 SolidWorks .....	14
3.2 Metoda konečných objemů .....	14
3.3 Základní rovnice popisující proudění .....	16
3.4 Turbulentní proudění .....	17
3.5 Šíření tepla .....	19
3.5.1 Vedení tepla (kondukce).....	19
3.5.2 Proudění tepla (konvekce) .....	21

3.5.3	Sálání tepla (záření, radiace).....	23
<b>4</b>	<b>Temperovaná podložka</b>	<b>25</b>
4.1	Temperovaná podložka realizována rezistory .....	25
4.2	Temperovaná podložka realizována měděným drátem .....	25
4.3	Temperovaná podložka realizována plošným spojem .....	26
4.3.1	Způsob řízení teploty na podložce a trysce.....	26
4.3.2	PWM hardware .....	28
<b>5</b>	<b>Simulace</b>	<b>29</b>
5.1	Temperovaná podložka s využitím výkonových rezistorů .....	29
5.2	Alternativní realizace temperované podložky v kruhové formě s využitím výkonových rezistorů.....	32
5.3	Simulace temperované podložky s využitím desky plošných spojů - čtvercová realizace.....	34
5.3.1	Prohřívání reálné temperované podložky s využitím desky plošných spojů .....	37
5.4	Temperovaná podložka s využitím desky plošných spojů - kruhová realizace .....	39
5.4.1	Varianta jednoduché spirály DPS .....	40
5.4.2	Varianta dvojité spirály DPS .....	41
5.5	Optimalizace chlazení pro krokové motory tiskárny .....	42
5.6	Simulace prohřívání trysky s chlazením .....	50
5.6.1	Prohřívání reálné trysky s chlazením.....	54
5.7	Vyhřívání vnitřních prostor tiskárny.....	55
5.8	Simulace sestavy pro 3D tisk s PLA materiálem.....	59
<b>6</b>	<b>Konstrukce tiskárny</b>	<b>62</b>
6.1	Hardware tiskárny .....	62
6.2	Elektronika tiskárny .....	65
6.3	Tiskací tryska.....	67
6.4	Extruder .....	69
6.5	Výhody tiskárny delta pi.....	70
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>72</b>
	<b>Literatura</b>	<b>74</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>75</b>

<b>A</b>	<b>Model zařízení</b>	<b>77</b>
<b>B</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>80</b>
<b>C</b>	<b>Simulace</b>	<b>85</b>
<b>D</b>	<b>Výkresová dokumentace</b>	<b>94</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Procentuální rozložení technologie 3D tisku v různých odvětvích. [4] .....	4
Obr. 1.2: RepRap tiskárna model Darwin. [5] .....	5
Obr. 1.3: RepRap tiskárna model Mendel. [5] .....	6
Obr. 1.4: RepRap tiskárna model Huxley. [5] .....	7
Obr. 1.5: RepRap tiskárna model Průša Mendel. [5] .....	8
Obr. 1.6: RepRap tiskárna model MendelMax. [1] .....	8
Obr. 1.7: RepRap tiskárna model Rostock Mini. [1] .....	9
Obr. 2.1: Struktura vrstev FDM tisku. [15] .....	10
Obr. 2.2: Schéma principu FDM tisku se stavebním i podpurným materiálem. [14] .....	11
Obr. 2.3: Různé typy plastových ABS vláken určených pro FDM tisk. [17] .....	12
Obr. 3.1: Schéma iteračního postupu v programu SolidWorks Flow Simulation. [8] .....	15
Obr. 3.2: Používané tvary v síti konečných objemů a členění objemu modelu. [9] .....	15
Obr. 3.3: Schéma základního označení výpočetní sítě. [9] .....	16
Obr. 3.4: Schematické zobrazení laminárního (vlevo) a turbulentního (vpravo) proudění [19] .....	18
Obr. 3.5: Schéma složení teplotního pole a jeho izotermických ploch. [19] .....	20
Obr. 4.1: Ilustrační schéma stavů při procentuálním vyjádření střidy 0-5 V. [20] .....	27
Obr. 4.2: Výkonové posílení výstupů pro PWM regulaci zařízení. [6] .....	28
Obr. 5.1: Temperovaná podložka ve tvaru čtverce realizována rezistory. ....	29
Obr. 5.2: Teplotní profil simulace čtvercové temperované podložky s rezistory. ....	30
Obr. 5.3: Teplotní profil skelněné desky čtvercové temperované podložky s rezistory. ....	31
Obr. 5.4: Graf teplotního profilu čtvercové temperované podložky s rezistory. ....	31
Obr. 5.5: Přestup tepla do okolí temperované podložky s rezistory. ....	32
Obr. 5.6: Temperovaná podložka ve tvaru kruhu realizována rezistory. ....	33
Obr. 5.7: Teplotní profil simulace kruhové temperované podložky s rezistory. ....	33
Obr. 5.8: Graf teplotního profilu kruhové temperované podložky s rezistory. ....	34
Obr. 5.9: Základní inicializace zjemnění sítě simulace temperované podložky DPS. ...	35
Obr. 5.10: Teplotní profil simulace temperované podložky DPS. ....	36
Obr. 5.11: Graf teplotního profilu čtvercové temperované podložky DPS. ....	36
Obr. 5.12: Rozložení proudové hustoty v meandru DPS. ....	37

Obr. 5.13: Snímky tepla termokamerou DPS podložky (vlevo) a s přiloženým sklem (vpravo).....	38
Obr. 5.14: Průběh počátku vyhřívání temperované podložky z obslužného programu Repetier.....	38
Obr. 5.15: Sít'ování modelu kruhové realizace temp. podložky formou DPS .....	39
Obr. 5.16: Zmenšené modely spirálových motivů pro temperované podložky DPS .....	39
Obr. 5.17: Teplotní profil kruhové podložky DPS vyhřívané jednoduchou spirálou. ....	40
Obr. 5.18: Rozložení proudové hustoty v jednoduché spirále. ....	40
Obr. 5.19: Teplotní profily obou variant kruhové temperované podložky DPS.....	41
Obr. 5.20: Trojrozměrný teplotní profil podložky DPS vyhřívané dvojité vinutou spirálou.....	41
Obr. 5.21: Rozložení proudové hustoty v dvojité vinuté spirále. ....	42
Obr. 5.22: Schéma simulace vzdálenosti větráku od pracovní desky .....	44
Obr. 5.23: Lokální zjemnění sít'ování v oblasti ventilátoru. ....	45
Obr. 5.24: Simulace přestupu tepla motoru v závislosti na chlazení prouděním vzduchu. ....	46
Obr. 5.25: Přestup tepla z motoru do okolních konstrukčních součástí. ....	46
Obr. 5.26: Graf závislosti teploty vzduchu na vzdálenosti větráku od desky.....	47
Obr. 5.27: Graf závislosti rychlosti proudění vzduchu na vzdálenosti větráku od desky. ....	48
Obr. 5.28: Rozložení teploty a její přestup do okolí na povrchu spodního rámu. ....	49
Obr. 5.29: Intenzita turbulencí při zapojení všech tří ventilátorů do simulace.....	49
Obr. 5.30: Rozměrové schéma trysky s chladícím ventilátorem .....	51
Obr. 5.31: Prohřívání trysky (vlevo) a přestup tepla do okolí (vpravo) bez chlazení. ...	52
Obr. 5.32: Prohřívání trysky (vlevo) a přestup tepla do okolí (vpravo) s chlazením. ....	53
Obr. 5.33: Graf znázorňující vliv ventilátoru na chlazení tělesa trysky. ....	53
Obr. 5.34: Snímky tepla termokamerou na hrotu trysky (vlevo) a přestup do chladiče (vpravo).....	54
Obr. 5.35: Průběh počátku vyhřívání hrotu trysky z obslužného programu Repetier. ...	55
Obr. 5.36: Schéma zdroje tepla a chlazení pro simulaci v modelu tiskárny .....	56
Obr. 5.37: Odvádění přestupujícího tepla z chladiče ventilátorem mimo oblast otevřené tiskárny.....	57
Obr. 5.38: Model uzavřené tiskárny s přimontovanými bočními deskami.....	58
Obr. 5.39: Proudění vzduchu chlazení v sestavě pro 3D tisk s PLA materiálem. ...	60
Obr. 5.40: Závislosti rychlosti proudění a teploty na vzdálenosti od trysky pro tisk s PLA. ....	60

Obr. 5.41: Simulace směrů proudění obou ventilátorů s využitím zobrazení trajektorií.	61
Obr. 6.1: Úhel svírající jednotlivá ramena (vlevo), schéma pohybu ramen (vpravo). ...	63
Obr. 6.2: Rozměry tiskárny (vlevo) a spodního rámu tiskárny (vpravo).....	63
Obr. 6.3: Teoretický (vlevo) a reálný (vpravo) obsah tisknutelné plochy tiskárny. ....	64
Obr. 6.4: Schéma maximálních velikostí temperované podložky pro delta pi tiskárnu.	64
Obr. 6.5: Arduino Mega 2560. [23] .....	65
Obr. 6.6: Deska s integrovaným obvodem IO-A4989. ....	66
Obr. 6.7: Deska s pěticí štítů k obsluze krokových motorů a jejich konektory. ....	66
Obr. 6.8: Deska s propojením pro Arduino, konektory termistorů, endstopů a napájení. .....	67
Obr. 6.9: Schéma složení soustavy trysky J-head pro Delta Pi tiskárnu. ....	68
Obr. 6.10: Extruder pro vytlačování taveného plastu použitý v tiskárně delta pi.....	69
Obr. 7.1: Trojrozměrný model 3D tiskárny typu delta pi. ....	77
Obr. 7.2: Trojrozměrný model 3D tiskárny typu delta pi, pohled z boku. ....	78
Obr. 7.3: Trojrozměrný model 3D tiskárny typu delta pi, pohled shora.....	78
Obr. 7.4: Fotografie fyzické sestavy tiskárny delta pi se všemi komponentami. ....	79
Obr. 7.5: Fotografie trysky a temperované podložky tiskárny delta pi. ....	79
Obr. 7.6: Tištěné konstrukční díly 3D tiskárny typu delta pi. ....	80
Obr. 7.7: Měděný meandr temperované podložky DPS. ....	81
Obr. 7.8: Zjednodušený měděný meandr temperované podložky DPS. ....	81
Obr. 7.9: Schéma zapojení integrovaného obvodu IO-A4989.....	82
Obr. 7.10: Schéma zapojení pětic štítů pro krokové motory. ....	82
Obr. 7.11: Schéma zapojení komunikačního modulu Arduino. ....	83
Obr. 7.12: Graf intenzity turbulencí v bezprostřední blízkosti chlazeného motoru ventilátorem. ....	85
Obr. 7.13: Grafické znázornění rozložení teploty mezi třemi vyntilovanými motory. ..	85
Obr. 7.14: Grafické zobrazení intenzity proudění vzduchu ventilátorem motoru v závislosti na vzdálenosti od desky. ....	86
Obr. 7.15: Grafické znázornění proudění vzduchu ventilátorem okolo motoru - čelní zobrazení. ....	87
Obr. 7.16: Simulace proudění teplého vzduchu mezi stěnami tiskárny. ....	87
Obr. 7.17: Simulace proudění tepla v otevřené (a), uzavřené s dírou (b), uzavřené (c) a zcela uzavřené (d) tiskárně. ....	88
Obr. 7.18: Teplotní profil temperované podložky DPS vyhřívané dvojité vinutou spirálou.....	89
Obr. 7.19: Ukázka implementace charakteristiky Mass Flow Rate při vytváření	

charakteristického modelu ventilátoru MC70101V1-0000-A99. ....	89
Obr. 7.20: Schéma proudění vzduchu z ventilátoru v žebrovitém chladiči trysky. ....	90
Obr. 7.21: Datasheet ventilátoru Sunon MC30151V1-0000-A99. ....	91
Obr. 7.22: Datasheet ventilátoru Sunon MC40060V2-0000-A99. ....	92
Obr. 7.23: Datasheet ventilátoru Sunon MC70101V1-0000-A99. ....	93

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1:	Porovnání vlastností materiálů ABS a PLA využívaných pro FDM tisk. [13].....	13
Tabulka 5.1:	Vlastnosti modelových materiálů simulace temperované podložky s rezistory. ....	30
Tabulka 5.2:	Vlastnosti modelových materiálů simulace temperované podložky DPS .....	35
Tabulka 5.3:	Vlastnosti krokového motoru NEMA 17 .....	43
Tabulka 5.4:	Hodnoty simulace v oblasti nasávání vzduchu rotorem ventilátoru. ....	45
Tabulka 5.5:	Tabulka vlastností použitých materiálů v simulaci trysky.....	51
Tabulka 5.6:	Porovnání jednotlivých naměřených veličin pro různé varianty uzavření tiskárny.....	58
Tabulka 6.1:	Vlastnosti tiskací trysky J-head v2.0 použité v tiskárně Delta Pi. ....	68
Tabulka 6.2:	Vlastnosti extruderu použitého v tiskárně Delta Pi. ....	69

# ÚVOD

V dnešní době je ve výrobě kladen stále větší důraz na rychlost a cenu. Používaná technologie výroby v zásadě nejvíce ovlivňuje tyto parametry. Výhodným řešením v kusové i malosériové výrobě může být zavedení prototypové technologie. Rapid prototyping či rapid manufacturing, obecně známější pod pojmem 3D tisk, jsou založeny na produkci součástí aditivní metodou, tedy přidáváním materiálu po vrstvách kladených na sebe bez obrábění. 3D tisk je v poslední době čím dál více se rozvíjející technologie tvorby předmětů. S její pomocí lze na rozdíl od konvenčních technik, jako je obrábění či lití, vytvářet i konstrukce náročných tvarů, které by nebylo možné jiným způsobem vytvořit.

Komerční tisk se dnes již dostal na vysoké úrovni i do oblastí jako je zdravotnictví. Tisk na těchto kvalitních průmyslových tiskárnách je vývojově dál, než tisk na nekomerčních přístrojích. Pořizovací ceny těchto tiskáren jsou ale velmi vysoké. Nekomerční 3D tiskárny, se svojí nízkou cenou a dostupností díky sdílení informací a dat Open Source, dosahují v posledních letech vysoké popularity a rozvoje. Tento trend pořízení tiskárny a její výroby je nazýván zkratkou RepRap (Replicating Rapid Prototyper). Pořizovací cena takové tiskárny se dnes pohybuje okolo 17 000 Kč.

V této práci je stručně popsán vývoj trendů v oblasti nekomerčních RepRap tiskáren. Uvedeny jsou zejména vývojově významné modely, jako je Darwin, Mendel nebo Mendel Průša. Kromě základního popisu jsou u jednotlivých modelů sepsány základní vlastnosti tiskáren spolu s jejich rozměry a váhou.

V teoretické části této práce je popsána technologie FDM (Fused Deposition Modeling) využívána k tisku na 3D tiskárnách s následným rozborem a vzájemným srovnáním dvou nejpoužívanějších materiálů této technologie. Jedná se o materiály PLA a ABS, ze kterých je ABS vybrán jako primární materiál pro tisk v konstruované tiskárně delta pi.

Jako úvod k simulacím je v práci popsán princip metody konečných prvků, který je využíván v souvislosti s numerickými metodami analýzy v programu SolidWorks Flow Simulation. Následně je uvedena teorie zabývající se typy proudění kapalin, které mohou při simulacích působit. Tato část je doplněna o teorii přestupu tepla v prostoru, a to vlivem kondukce, konvekce a radiace.

Praktickou část tvoří diskutované modely temperované podložky a následné výsledky jejich simulací s rozložením a přestupem tepla mezi solidy a okolním prostorem. Využity jsou dvě varianty vyhřívání, a to vyhřívání výkonovými rezistory a vyhřívání pomocí meandru na desce plošných spojů.

Dále jsou v praktické části uvedeny výsledky simulací prohřívání trysky v závislosti na chlazení ventilátorem, chlazení motorků umístěných v podstavě, které

pohání vodící řemeny delta ramen tiskárny, a simulace intenzity proudění tepla přestupujícího z temperovaných součástí ve vnitřních prostorech se vztahem k míře uzavření případného opláštění tiskárny.

Poslední kapitola praktické části je věnována samotné konstrukci a sestavení tiskárny spolu s výčtem základních vlastností a možností, jimiž tiskárna disponuje. Kromě toho jsou zde uvedeny použité tiskací prvky, jako jsou extruder a tiskací tryska, a jejich technické parametry spojené s tiskem.

Výstupem této práce je návrh optimalizovaného modelu 3D tiskárny typu delta pi v systému CAE a fyzická konstrukce mechanické sestavy tiskárny s připojením elektronických a tiskacích prvků. Typ delta pi je reprezentován v oblasti RepRap tiskáren modelem Rostock Mini.

# 1 3D TISK

Pojmem 3D tisk označujeme proces, při kterém se pomocí specifického zařízení modelují třírozměrné objekty z určitého materiálu. Veškeré technologie tisku mají společný základní princip, a to kladení jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Tato metoda se nazývá aditivní výroba a je přímým opakem k procesu obrábění materiálu. Místo postupného obrábění modelu z celistvého materiálu jeho řezáním, vrtáním či frézováním, je finální výrobek materiálem přímo vyráběn.

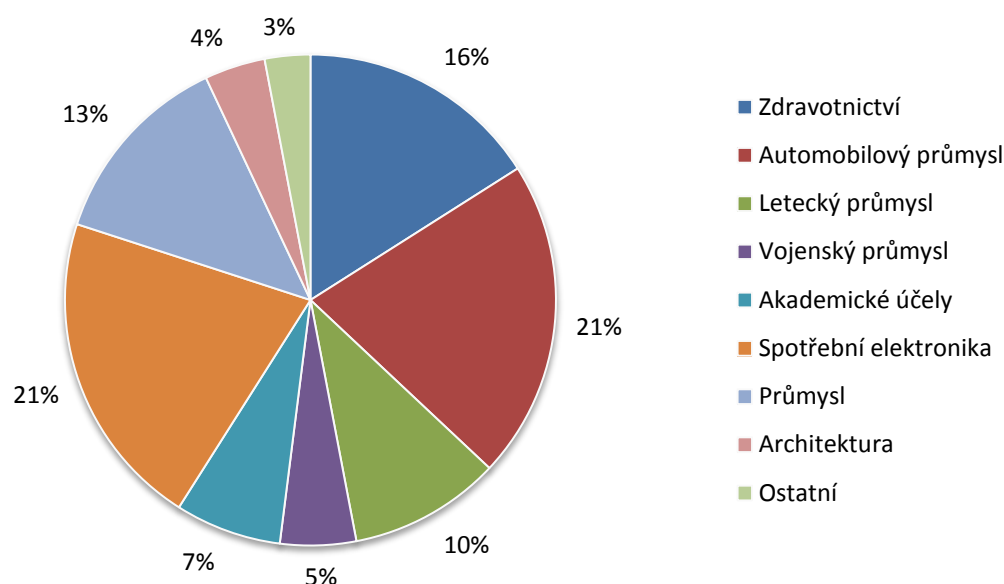
## 1.1 Historie

Vznik technologie 3D tisku se datuje do druhé poloviny 20. století, kdy si Charles W. Hull nechal 11. března 1986 patentovat technologii stereolitografie (*Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, US 4575330A). Technologie stereolitografie spočívá v třírozměrném tisku za použití UV laseru a tekutého fotopolymeru, jehož polymerace je vyvolána UV zářením. Koncem 90. let vytvořil Charles Hull pod záštitou jeho firmy 3D Systems první stereolitografický aparát tisknoucí 3D modely pro širokou veřejnost s označením SLA-1. Modely SLA se staly základem pro vývoj dnešních 3D tiskáren či CNC (*Computer Numerical Control*) počítačově řízených obráběcích strojů.

V roce 1993 si nechal Massachusettský technologický institut patentovat technologii tiskařské techniky, která pracovala s práškovým materiálem, jenž byl spojován tekutým spojovačem. Na bázi této technologie započal již vývoj 3D tiskáren jako takových. Samotný pojem 3D tiskárny tedy pochází až z druhé poloviny devadesátých let 20. století.

V posledních letech se 3D tisk velmi rychle rozvíjí a jeho popularita stále roste. 3D tiskárny lze využívat k tisku prototypů, vytváření náhradních dílů a originálních designových výrobků. Oblast využití 3D tiskáren a aktuální tiskařské trendy se neustále rozšiřují. Setkat se s nimi můžeme například v oblasti automobilového či leteckého průmyslu. Dále pak při zmenšených modelech budov v architektuře a ve stavebnictví, kde dnes již není problém tisknout s využitím speciální techniky velké části domů. K velkému rozvoji tisku dochází ve zdravotnictví, kde se nabízí produkce nejrůznějších protetik a implantátů. V České republice je již několik firem, které touto metodou tisknou například kloubní náhrady. [2] [3]





Obr. 1.1: Procentuální rozložení technologie 3D tisku v různých odvětvích. [4]

## 1.2 Rapid Prototyping

3D tiskárny k výrobě modelů využívají metodu Rapid Prototyping nebo také Rapid Manufacturing. Jedná se o soubor technologií pro rychlou výrobu dílů, které jsou plně funkční a svými mechanickými vlastnostmi se blíží finálnímu výrobku, který mohou dokonce nahradit. Tyto prototypy nejsou většinou příliš vhodné k většímu zatížení a slouží spíše k designéřskému posouzení či pro výrobu vzorkových sérií k ověření vlastností a pro funkční zkoušky navržených dílů. Základem výroby metodou Rapid Prototyping je vytvoření virtuálního modelu reálné součástky s využitím procesu digitalizace, například pomocí CAD (*Computer Aided Design*) softwaru nebo díky prostorovému skenování. Vytvořený model je následně transformován do vhodného formátu pro obslužný program tiskárny. Zde je struktura modelu rozdělena na tenké vrstvy, které se pak reálně nanášejí různými technologiemi (SLS, FDM, SLA) a vrství se na sebe. [10]

## 1.3 Projekt RepRap

RepRap, zkratka z anglického názvu Replicating Rapid Prototyper, je mezinárodní komunitní projekt zaměřený na 3D tiskárny. Ty jsou vyvíjeny na principu Open Source, tedy veřejně přístupném sdílení dat a informací týkajících se konstrukcí tiskáren. Tento projekt byl započat v roce 2005 Dr. Adrianem Bowyerem. Jak už je z názvu zřejmé, jde o tiskárny se schopností sebereplikace. Tiskárny dokážou tisknout jakékoliv součástky, které jsou zapotřebí pro jejich konstrukci.

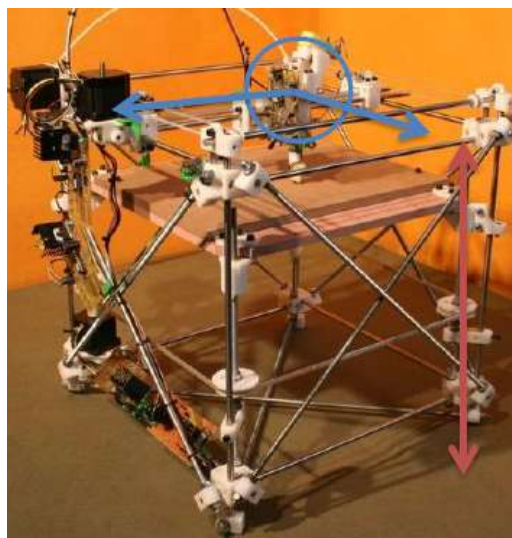
Open Source, v překladu volný přístup, je způsob vývoje a distribuce, který umožňuje přístup k veškerým datům daného produktu. To vytváří vhodné podmínky pro nepřetržitý vývoj ve spolupráci rozsáhlé komunity uživatelů. V rámci Open Source je veškerá dokumentace nutná k sestavení tiskárny a provozu vlastního RepRapu, včetně firmware a řídicího software. Vše je volně k dispozici pod licencí GNU GPL (General Public License). Licenci původně napsal Richard Stallman pro projekt GNU. Filosofii licence je poskytnout uživatelům programu práva svobodného softwaru a zajistit, aby byly tyto svobody zachovány, i když je program změněn nebo upraven. Díky distribuci informací a cenové dostupnosti se RepRap stává stále více celosvětově oblíbeným projektem typu DIY (*Do It Yourself*). [1] [2] [3]

## 1.4 Modely RepRap tiskáren

V projektu RepRap existují v současnosti čtyři základní typy tiskáren se jmény Darwin, Mendel, Mendel-Prusa a Huxley. Z těchto tiskáren se pak dále rozvíjejí další jejich modifikace.

### 1.4.1 Darwin

První tiskárna typu RepRap vznikla na jaře roku 2007. Je považována jako první článek v evoluci RepRap tiskáren, a proto nese příznačné jméno Darwin. Konstrukce je složena z kovových tyčí a plastových spojovacích dílů. Vyhřívaný stůl (*Heating Bed*) je posuvný ve vertikálním směru při tisku shora dolů a je polohován dvěma krokovými motory. Pohyb nahoru a dolů je prováděn pomocí rotujících závitových tyčí a je závislý na rychlosti nanášení vrstev tisku produktu, který je umístěn na výhřevné desce. V horní části jsou umístěny dvě výhřevné trysky pro FDM tisk, které umožňují tisk podpůrného materiálu. Celá tisková hlava je také polohována horizontálně pomocí závitových tyčí.

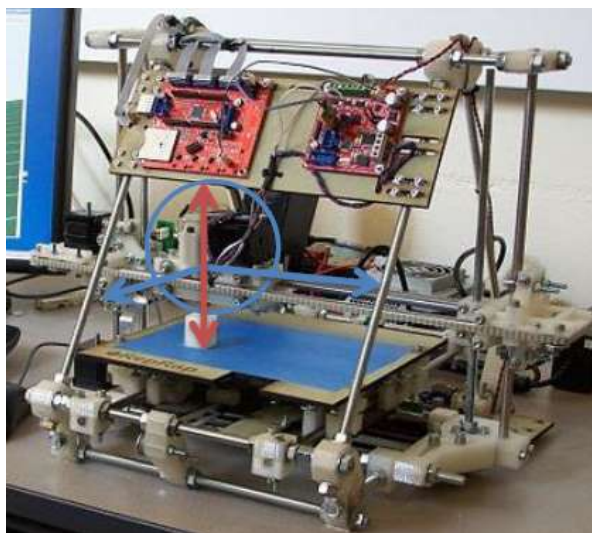


Obr. 1.2: RepRap tiskárna model Darwin. [5]

Tisknutelný objem je dán právě tříosým systémem, který umožňuje tisknout tělesa o rozměrech 230mm (osa X) x 230mm (osa Y) x 100mm (osa Z) v základním sestavení. Vnější rozměry přístroje jsou 600mm x 520 mm x 650mm. Při požadavku tisku většího tělesa mohou být rozměry upraveny. Celková váha tiskárny v základním sestavení je okolo 14kg. [1] [5]

### 1.4.2 Mendel

Další tiskárna, označovaná jako tiskárna druhé generace, nese název Mendel. Byla zkonstruovaná v létě 2009 studentem Edem Seelsem na britské University of Bath, pod vedením Dr. Adriana Bowyera. Jde zejména o vylepšení modelu Darwin. Plastové pojezdy v tiskárně Darwin zde byly nahrazeny kuličkovými ložisky. Odstranily se tak problémy s třením a krokování pohybu je tak přesnější. Posuv ve vertikálním směru již nevykonává vyhřevná podložka pro tisknutý model, ale samotná tisková hlava, která je umístěna na závitových tyčích. Plastové konstrukční části byly vytištěny právě na jejím předchůdci tiskárně Darwin. Velikostně oproti předchozímu modelu je tiskárna menší, avšak má větší vyhřevnou plochu pro tisk.



Obr. 1.3: RepRap tiskárna model Mendel. [5]

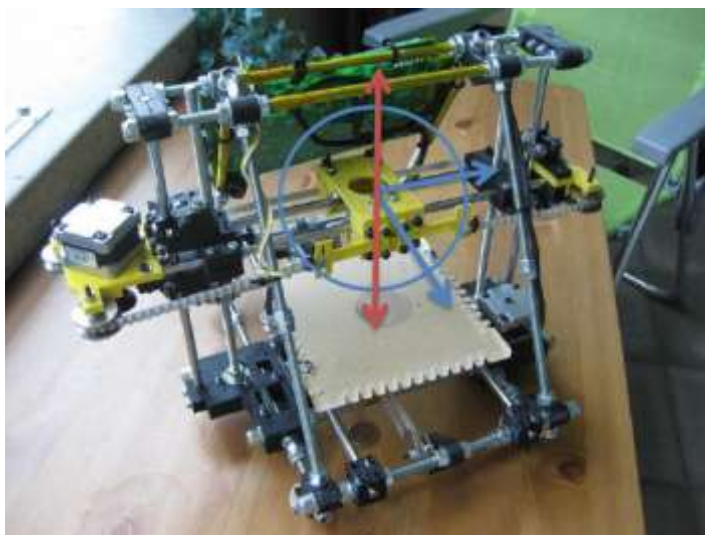
Tisknutelný objem je v modelu Mendel umožněn ve velikostech 200mm (osa X) x 200mm (osa Y) x 140mm (osa Z), přičemž vnější rozměry celého přístroje jsou 500mm x 400 mm x 360mm. Oproti modelu Darwin není rozdíl jenom v menší velikosti, ale i v poloviční váze celého zařízení, která je 7kg. [1] [5]

### 1.4.3 Huxley

Huxley tiskárna je často označována jako třetí verze RepRap tiskáren, jinými slovy se jedná o třetí generaci 3D tiskárny RepRap. Principiálně je navržena jako zmenšený model tiskárny Mendel s některými přetvořenými díly. Plastové díly Huxley mají celkový objem o 70% menší oproti modelu Mendel. To znamená, že reprodukce těchto

dílů je třikrát rychlejší než u dílů jejího předchůdce. Vývoj obou tiskáren probíhal paralelně a jeho úkolem bylo vytvořit dvě tiskárny, které se vzájemně doplňují.

Cílem při vývoji modelu Huxley bylo vytvořit zjednodušený a zmenšený model, jenž by byl rychlejší tiskárnou. Oproti tiskárně Mendel, která by zůstala univerzálním nástrojem se všemi jejími možnostmi. Ve vývoji se objevily i nápady o vytvoření zařízení umožňující tiskárně Huxley stát se kreslicí jednotkou s použitím různých druhů psacích per. Jako příklad využití je možnost popisování desek plošných spojů. [1] [5]

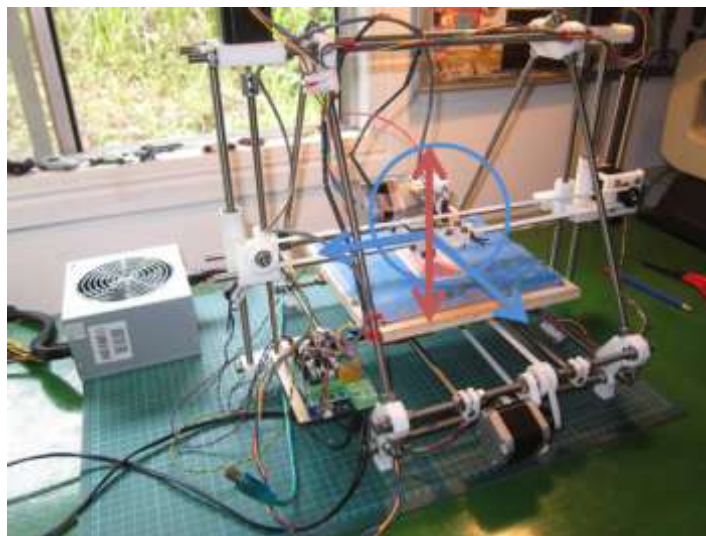


Obr. 1.4: RepRap tiskárna model Huxley. [5]

Tisknutelné rozměry toho modelu jsou přibližně 140mm (osa X) x 140mm (osa Y) x 110mm (osa Z) a vnější rozměry celé konstrukce jsou 260mm x 280 mm x 280mm.

#### 1.4.4 Prusa Mendel

Tiskárna Prusa Mendel vychází, jak už název napovídá, z modelu Mendel a navrhnul ji český student ekonomie Josef Průša v roce 2010. Její zásadní rozdíl oproti verzi Mendel je v umístění elektroniky ovládání mimo konstrukci tiskárny. Díky tomuto kroku je umožněna větší pracovní výška trysky. Významné je i zpevnění celé konstrukce svislých tyčí nesoucích tiskovou hlavu pomocí podpůrných tyčí ve tvaru trojúhelníku. Hlava tiskárny se pohybuje ve směru horizontálním vlevo a vpravo, ve směru vertikálním slouží k nanášení vrstev. Pohybu trysky dopředu a dozadu je docíleno posuvem samotného výhřevného stolku, který zde není stacionární. [1] [5]

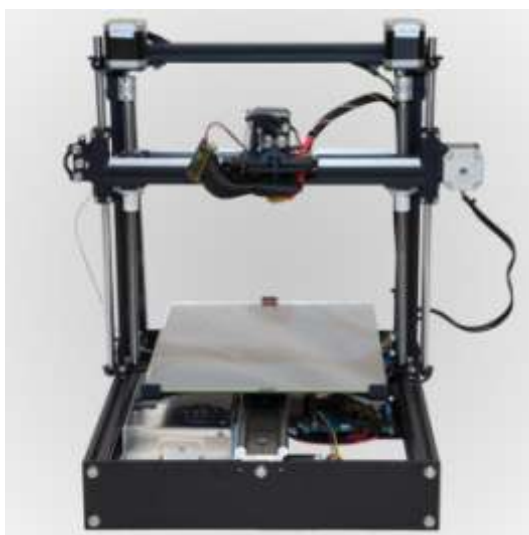


Obr. 1.5: RepRap tiskárna model Průša Mendel. [5]

Tisknutelné rozměry v tomto modelu jsou limitovány na 200mm (osa X) x 200mm (osa Y) x 100mm (osa Z). Vnější rozměry zařízení jsou 440mm x 470 mm x 370mm.

### 1.4.5 MendelMax

Základní koncepce sestavení vychází z modelu Průša Mendel, kde zachovává systém tisku avšak s přetvořeným rámem celé konstrukce. Závitové tyče zde nahrazují levnější hliníkové lišty, které jsou spojovány pomocí tištěných konzol. Celá tiskárna tím získává mnohem větší tuhost při zachování konstrukční jednoduchosti. První verze tiskárny MendelMax vznikla v prosinci roku 2011.



Obr. 1.6: RepRap tiskárna model MendelMax. [1]

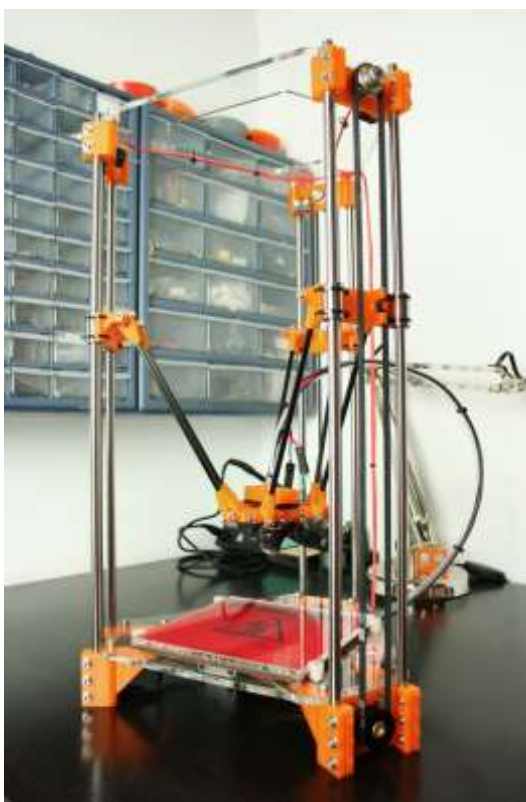
Druhá verze, která je označována jako MendelMax 2.0, prošla odlehčením díky redukci konstrukčních částí rámu. Tvarově stále zachovává stále stejný systém tisku



v osách X,Y a Z, avšak postavení podpěr pro závitové tyče zajišťující posuv v ose Z nahradila konstrukce ve tvaru pravoúhlého trojúhelníku. To umožňuje prodloužení pohybu extruderu právě v ose Z. [1]

#### 1.4.6 Rostock Mini

Jedná se o typ tiskárny delta, která má oproti dřívějším modelům naprosto nový design konstrukce. Posun tiskové hlavy zde zastává delta robot, jenž je uchycen na třech svislých profilech a k pohybu využívá tři nezávisle zavěšená ramena. První konstrukce byla původně tvořena čtyřmi vertikálními rameny, které umístěním mezi sebou svíraly 90°. Sestavovací oblast tak byla čtvercová a ne trojúhelníková či šestiúhelníková jako u verze se třemi rameny, které mezi sebou svírají 120°. Lepší výsledky torzní tuhosti dosahuje ovšem tiskárna se třemi nosníky a koncept se čtyřmi rameny se dále nerozvíjel. Ramena jsou vyrobena z lehkého kompozitního materiálu, což má za výsledek malou hodnotu setrvačnosti, a umožňuje tak rychlejší pohyb trysky. Uchycení je provedeno skrz speciální všesměrové klouby. Pohyb ramen po nosných pilířích je dosažen třemi v základně umístěnými krokovými motorky, které posouvají patice ramen pomocí ozubených řemenů ve vertikálním směru. Nespornou výhodou tohoto jedinečného designu je, že odstraňuje veškeré otřesy vyhřívané podložky pro tisknutý model, které v předešlých tiskárnách byly způsobeny posuvem podložky v horizontálním směru. [1] [5]



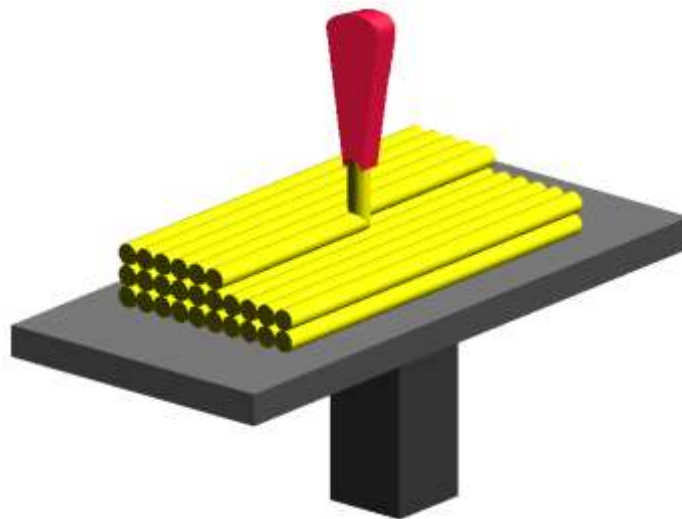
Obr. 1.7: RepRap tiskárna model Rostock Mini. [1]

## 2 TECHNOLOGIE FDM TISKU

Jednou z metod tisku 3D objektů je metoda Fused Deposition Modeling, zkráceně FDM. Tuto metodu vynalezl a nechal si patentovat v roce 1989 Američan S. Scott Crump spolu se svojí ženou Lisou. Stali se zakladateli firmy Stratasys, Ltd., která se zabývá výrobou 3D tiskáren a jejich systémů pro různá technická oddělení (např. letecký a automobilový průmysl, elektronika nebo lékařství).

### 2.1 Princip FDM tisku

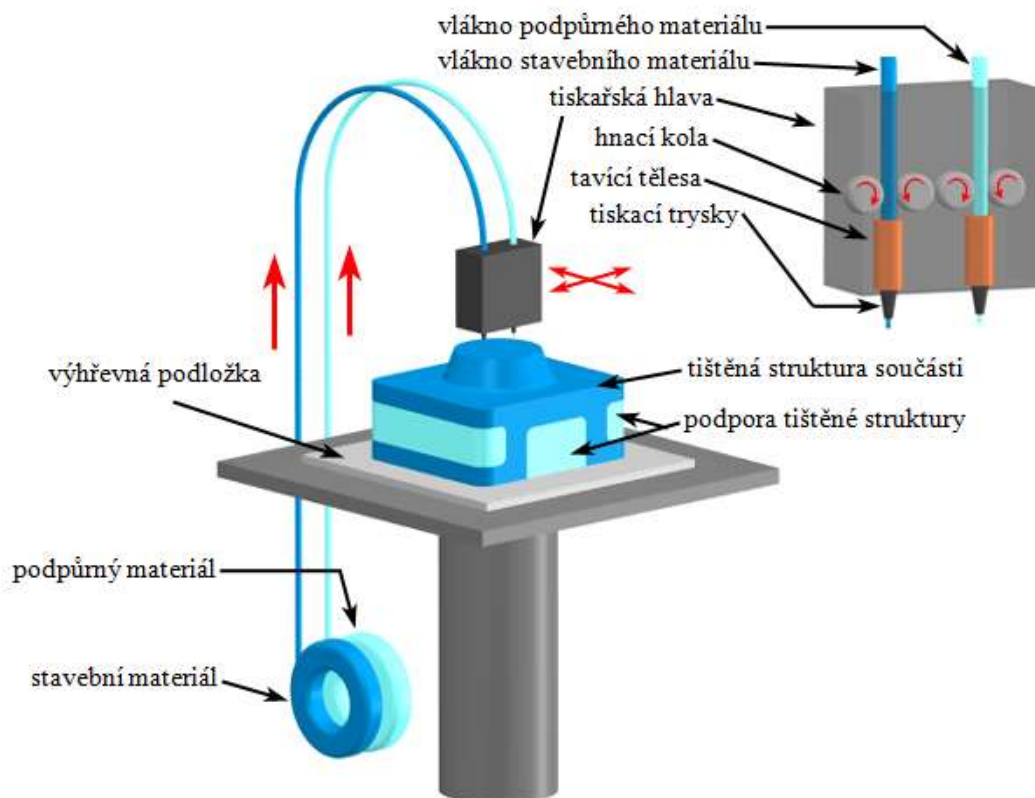
Princip této metody tisku spočívá v nanášení tenkých vrstev taveniny materiálu na sebe podle virtuálního modelu výrobku. Tavený materiál je uložen ve formě vlákna o průměrech 1,75mm až 3 mm uloženého na cívce, ze které je odvíjen extruderem požadovanou rychlostí do tavící hlavy. Zde dochází k roztavení vlákna a tryskou je pak vytlačováno na pracovní plochu tiskárny, kterou tvoří temperovaná deska. Pracovní deska je vyhřívána z toho důvodu, aby nevznikaly deformace chladnutím taveniny. Ta má při ztrátě tepla tendenci se smršťovat. Aby bylo možné vrstvit taveninu na sebe, je nutné, aby se model vůči trysce po každé nanesené vrstvě vzdálil o vzdálenost, která je rovna tloušťce jedné vrstvy. To zabezpečuje posun vyhřevné desky směrem dolu nebo naopak posuv tiskařské hlavy nahoru. Kladení jednotlivých vrstev na sebe umožňuje konstrukci složitých geometrií modelů, kterých tradičními metodami výroby nelze dosáhnout. [15]



Obr. 2.1: Struktura vrstev FDM tisku. [15]

Ještě složitější geometrické struktury umožňuje tisk s přidáním podpurného materiálu. Při této technologii se používají k tisku dva typy materiálů. Jedním materiálem je

klasický stavební materiál, druhým je podpůrný materiál, který je po dokončení tisku zcela odstraněn zahřátím nebo ponořením do speciální lázně vodného roztoku. Tento materiál má povahu lešení, kdy podpírá stavební plast v procesu vychládání a tuhnutí.



Obr. 2.2: Schéma principu FDM tisku se stavebním i podpůrným materiálem. [14]

## 2.2 Materiály vhodné pro FDM tisk

Technologie FDM tisku využívá k tisku materiály ze skupiny termoplastů a také vosky, které se využívají nejvíce ve slévárenském průmyslu k tisku forem. Mezi nejčastěji využívané termoplasty patří například ABS (akrylonitril-butadien-styren), PLA (polyactic acid) nebo PC (polykarbonát) a jeho deriváty. V současnosti se nejčastěji pro tisk využívají materiály ABS a PLA. Oba materiály mají své výhody i nevýhody, podle nich je možné vybrat, který bude vhodnější pro daný tisk.

### 2.2.1 ABS (akrylonitril-butadien-styren)

ABS je amorfní termoplastický průmyslový kopolymer na ropné bázi, který se díky své nízké ceně velmi často využívá právě na tisk v 3D tiskárnách. Je velmi pevný, tvrdý a odolný vůči mechanickému poškození. Dle typu je odolný proti nízkým i vysokým teplotám, díky akrylonitrilu a styrenu je odolný vůči kyselinám, louhům, olejům a tukům. Kopolymery ve složení styren - akrylonitril se používají již od čtyřicátých let.



Butadien se začal přidávat až v roce 1948, kdy byl ABS patentován. Povrchovou úpravu můžeme provádět broušením, tmelením nebo lakováním akrylovými barvami. Neupravený má neprůhlednou krémovou barvu. ABS musí být extrudován při vyšších teplotách okolo 230°C a zpracovává se do 280°C, při vyšších teplotách se začíná rozkládat. Tepelná odolnost výrobků je 105°C. Při tisku je nutné používat vyhřívanou podložku vyhřátou přibližně na 105°C, aby se materiál uchytil a nedocházelo tak k posuvu modelu při tisku.

Mezi významné vlastnosti ABS patří vysoká pevnost v tahu, tvrdost povrchu a tuhost ve velkém rozsahu teplot. Dále pak rozměrová stálost materiálu. Je flexibilní a na povrchu lesklý. ABS je snadno mísitelný s jinými polymery, jako je například polyvinylchlorid, polykarbonát nebo polysulfon. Při požadavku specifických vlastností se do ABS přidávají další látky v určitých poměrech. Je možné například zvyšovat ochranu proti UV záření nebo zamezit hoření látky. ABS se využívá v různých odvětvích průmyslu, například v automobilovém průmyslu. [12]



Obr. 2.3: Různé typy plastových ABS vláken určených pro FDM tisk. [17]

### 2.2.2 PLA (polyactic acid)

PLA je termoplastický alifatický polyester na bázi přírodního cukru a kukuřičného škrobu, který je vázán kyselinou mléčnou a která se získává kvašením. Při sloučení těchto prvků vznikají makromolekuly polymeru PLA. Tento materiál je díky složení biologicky odbouratelný a za určitých podmínek dochází k jeho rozkladu na původní suroviny. Jeho využití nalezneme zejména v oblasti textilního průmyslu. Oproti ABS má PLA nižší energetické nároky na zpracování díky nižší teplotě tavení, která je okolo 175°C. Je vhodné používat chlazení větráčkem umístěným u trysky kvůli delší době chlazení. Díky jeho poměrně velké stabilitě není nutné použít vyhřívanou podložku. Výhodou je jeho malý sklon ke kroucení, který je dán minimálním rozpínáním při tavení, a díky tomu je ideální pro výrobu složitějších geometrických tvarů. Nevýhodou je jeho pořizovací cena, která je vyšší než u ABS. [12]

Tabulka 2.1: Porovnání vlastností materiálů ABS a PLA využívaných pro FDM tisk. [13]

Vlastnosti	ABS	PLA
Molekulární vzorec	$C_8H_8+C_4H_6+C_3H_3N$	$C_3H_4O_2$
Šetrný k životnímu prostředí	NE	ANO
Rozložitelné	NE	ANO
Teplota tání	205°C	175°C
Tvrdost podle Rockwella	R105 - R110	R70 - R90
Kvalita povrchu	jemná	dobrá
Doba chlazení	střední	dlouhá
Tepelná odolnost	105°C	110°C
Zápach	Silný zápach plastu	Jemná sladká vůně
Absorpce vlhkosti	3-5%	minimální
Rozpusťnost ve vodě	nerozpusťné	nerozpusťné (lepší)
Hustota	1,04 g/cm <sup>3</sup>	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Prodloužení v tahu	20%	3,8%
Teplota skelného přechodu	105°C	60-65°C
Pevnost v tahu	44,81MPa	57,8MPa
Pevnost v ohybu	75,84MPa	55,3MPa
Pevnost v tlaku	46,54MPa	-
Pružnost v tahu	2,28GPa	2,3GPa
Pružnost v ohybu	2,21GPa	3,3GPa

### 2.2.3 PC (polykarbonát)

PC je pevný a houževnatý termoplast. Je odolný proti opotřebení a má vysokou pevnost v ohybu. Pevnost při spojení jednotlivých vrstev je velice vysoká, a tak je zaručena dlouhá životnost. Jedním z derivátů je sloučenina PC-ABS, která kombinuje pevnost polykarbonátu a pružnost ABS. Tím tento materiál získává výborné mechanické vlastnosti. [12]

## 3 TEORIE SIMULACÍ

Abychom mohli optimálně určit rozmístění a výkon zdrojů tepla v temperované podložce, je vhodné nejprve využít počítačový software pro návrh modelů CAE (Computer Aided Engineering). V této práci je použit program SolidWorks s rozšířením Flow Simulation, ve kterém jsou prováděny simulace přestupu tepla.

### 3.1 SolidWorks

Program SolidWorks od společnosti Dassault Systèmes SolidWorks je v současné době jeden z nejvyužívanějších strojírenských 3D návrhových systémů. Poskytuje veškeré nástroje potřebné k návrhu a konstrukci jakéhokoli tělesa. Jde o parametrický 3D modelovací program, který umožňuje navrhovat výkonné plošné i objemové modely. Program je velice intuitivní a umožňuje práci s jednotlivými díly i rozsáhlými sestavami. Základní verzi programu lze rozšířit o nadstavbové moduly, které umožní širší zpracování či analýzu modelu.

Nadstavba Flow Simulation je integrační modul, který umožňuje komplexní simulace dynamiky tekutin a sdílení tepla (CFD - *Computational Fluid Dynamics*). Jeho praktické využití zasahuje do různých oblastí proudění plynů či kapalin v uzavřených prostorech. Dále umožňuje analýzy chlazení uzavřených prostorů nebo externí aerodynamiky. Flow Simulation je výkonným nástrojem na výpočet proudění a pro analýzu rozložení rychlosti, tlaku a dalších jevů, které mohou ovlivňovat navržený výrobek. [11]

#### **Funkce Flow Simulation:**

- Analýza sdílení tepla (vedením, prouděním a zářením)
- Analýza vnitřního a vnějšího proudění
- Analýza rotačních oblastí (ventilátory, čerpadla, ...)
- Analýza přechodových dějů (časově proměnné děje)

### 3.2 Metoda konečných objemů

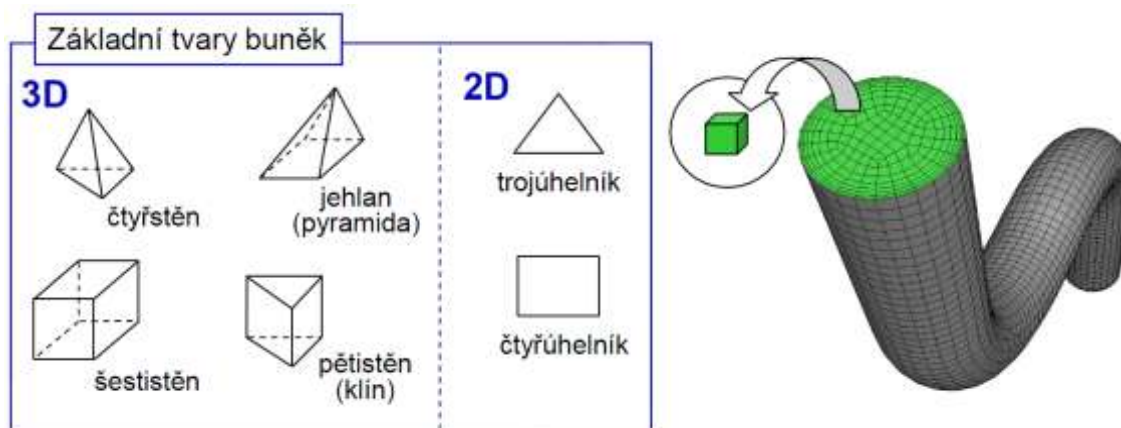
Metoda konečných objemů vznikla na začátku sedmdesátých let a jejím hlavním využitím jsou oblasti mechaniky tekutin, tedy pohybu materiálu přes pevně zadaný objem. MKO je numerická metoda, která principiálně spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého konečného počtu nepřekrývajících se elementů, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých bodech. V těchto bodech jsou soustředěny fyzikální parametry popisující stav či vlastnosti příslušného místa kontinua.

Při studiu fyzikálních jevů se řešení parciálních diferenciálních rovnic převádí na řešení obyčejných diferenciálních, popřípadě algebraických rovnic. Tato metoda je efektivní při použití u simulací na modelech se složitou geometrií. [8] [9]



Obr. 3.1: Schéma iteračního postupu v programu SolidWorks Flow Simulation. [8]

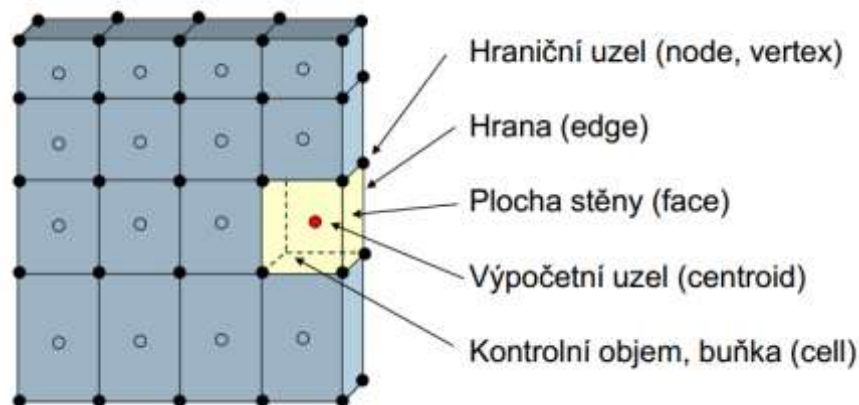
Řešená oblast je rozdělena na strukturovanou síť pomocí konečného počtu malých kontrolních objemů. K rozdělení modelu se využívají konečné objemy obdélníků a čtyřúhelníků v případě dvourozměrného prostředí. V trojrozměrných modelech se používají objemy kvádrů či šestistěnů. Jiným přístupem oproti strukturované síti je nestrukturovaná síť, ve které je konečným objemem čtyřstěn, jehlan nebo pětistěn.



Obr. 3.2: Používané tvary v síti konečných objemů a členění objemu modelu. [9]

Jednotlivé sítě lze mezi sebou kombinovat, čímž získáme optimální síť. Hranice jednotlivých prvků v modelu musí vždy sousedit s jedinou hranicí sousedního elementu.

Základní rovnice, jako jsou rovnice kontinuity, pohybové či rovnice energie, které popisují spojité prostředí, jsou diskretizovány do soustavy algebraických rovnic. Hodnoty složek skalárních veličin jsou v geometrických středech kontrolních objemů, hodnoty na hranicích objemů se získávají interpolací. [8] [9]



Obr. 3.3: Schéma základního označení výpočetní sítě. [9]

### 3.3 Základní rovnice popisující proudění

Proudění je charakteristická vlastnost pro kapaliny (kapaliny a plyny), tedy látky, které se vyznačují svojí tekutostí. Kapaliny jsou schopny měnit svůj tvar a přizpůsobovat se tak tvaru okolí, ve kterém se nachází. Schopnost kapalin a plynů téci je pro každou kapalnou látku odlišná a je dána jejich viskozitou.

Základní fyzikální zákony popisující proudění jsou zákony o zachování hmotnosti, hybnosti a energie a jsou popsány parciálními diferenciálními rovnicemi, k nimž přistupují okrajové a počáteční podmínky. Jejich analytické řešení je velmi obtížné a tak je možné pouze pro výrazně zjednodušené aplikace. V současné době se používají ve větším měřítku numerické metody. Ty jsou vyjádřeny matematicky pomocí rovnice kontinuity, přenosu hybnosti a rovnice přenosu energie.

Program SolidWorks Flow Simulation vychází při simulaci z fyzikálního popisu pohybu tekutiny, který je dán základními zákony vyjádřenými systémem tří parciálních diferenciálních rovnic, doplněný o stavovou rovnici. Jde o trojrozměrný typ proudění stlačitelné vazké tekutiny s přívodem tepla. Jedná se tak o soustavu nelineárních parciálních diferenciálních rovnic.

Rovnice kontinuity, vyjadřující zákon zachování hmotnosti, nabývá tvaru

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \text{ složka } i = 1, 2, 3, \quad (3.1)$$

kde  $u_i$  je rychlost tekutiny,  $t$  je čas a  $\rho$  je hustota tekutiny.

Stokes - Navierova rovnice, vyjadřující aplikovanou Newtonovu větu o změně hybnosti, má tvar

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \text{ index } j = 1, 2, 3, \quad (3.2)$$

kde  $S_i$  jsou vnější hmotnostní síly působící na jednotku hmotnosti (kupř. tíhová, odstředivá),  $\tau_{ik}$  je tensor vazkových napětí a  $ij$  jsou indexy u veličin udávající sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace).

Rovnice energie, vyjadřující zákon o zachování energie pro stlačenou tekutinu, nabývá tvaru:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} (E + p) = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad (3.3)$$

kde  $q_i$  je difusní tok tepla,  $Q_H$  je přívod či odvod tepla vztažený na jednotku objemu, ve které můžeme vyjádřit  $E$  jako

$$E = e + \frac{v^2}{2}, \quad (3.4)$$

kde  $e$  je vnitřní energie a  $v$  je rychlost tekutiny.

Rovnice stavu, vztahující určovací veličiny stavu tekutiny, pro uvažovaný ideální plyn, vyjádříme tvarem

$$\rho = \frac{p}{RT} [kg \cdot m^{-3}], \quad (3.5)$$

kde  $R$  je všeobecná plynová konstanta a  $T$  je teplota tekutiny.

Výše uvedené základní rovnice pro řešení proudění stlačitelné tekutiny s uvažováním tření, vyjadřující zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie, lze vyjádřit vhodným zápisem v obecné konzervativní formě

$$\frac{\partial (\rho \zeta)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \zeta) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \right) + S_\zeta, \quad (3.6)$$

kde  $\zeta$  je proměnná a členy na pravé straně diferenciální rovnice jsou postupně zleva konvektivní člen, difúzní člen a zdrojový člen. [6]

Při výpočtu pomocí SolidWorks Flow Simulation platí pro proudění a přestup tepla obecně výpočtové schéma (viz obr. 3.1), ve kterém jsou postupně řešeny zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Celý proces iteračního postupu se opakuje do doby, kdy je dosaženo konvergence všech výsledků.

### 3.4 Turbulentní proudění

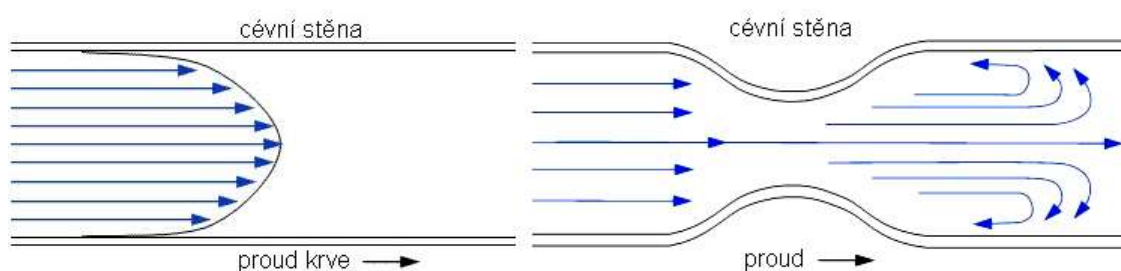
Pohyb tekutin je v základě rozlišován na dva zcela odlišné typy proudění, a to laminární proudění a proudění turbulentní. Mez jejich rozdílnosti udává hodnota Reynoldsova čísla. Reynoldsovo kritické číslo (označováno  $Re$ ) definuje poměr viskózních a setrvačných sil a je určováno jako bezrozměrné kritérium z okrajových

a fyzikálních podmínek. Jeho hodnota charakterizuje přechodovou oblast kapalin, tedy nejnižší hodnotu, při které dochází k přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním. Reynoldsovo číslo je nejčastěji definováno vztahem

$$Re = \frac{v_s \cdot d_h}{\nu}, \quad (3.7)$$

kde  $v_s$  je střední rychlost proudění,  $d_h$  je tzv. hydraulický průměr (průměr potrubí, ve kterém kapalina proudí) a  $\nu$  značí kinematickou viskozitu.

Při proudění v potrubí platí, že kritická hodnota  $Re$  pro laminární proudění je 2320 ( $Re < 2320$ ). Při laminárním proudění se částice tekutiny pohybují ve svých vrstvách bez přestupu mezi nimi napříč průřezem potrubí. Při hodnotě  $Re$  převyšující číslo 2320 se již laminární proudění mění na turbulentní. Turbulentní proudění je charakterizováno vířením částic, to znamená, že proudění se stává časově proměnlivým trojrozměrným pohybem, při němž se jeho veličiny (tlak, rychlost, teplota, ...) mění nahodile. Ke změně proudění nedochází skokově, nýbrž postupně. Při zvyšování čísla (např. zvyšováním rychlosti proudění) se zvyšuje i neuspořádaný pohyb všemi dostupnými směry. Zpočátku se objevují krátké úseky s turbulentním prouděním, které přechází do delších oblastí laminárního proudění. S postupným zvyšováním rychlosti, a tedy i  $Re$  čísla, jsou delší laminární úseky zkracovány a nahrazovány úseky turbulentními, až nakonec zcela vymizí.



Obr. 3.4: Schematické zobrazení laminárního (vlevo) a turbulentního (vpravo) proudění [19].

Následkem promíchávání tekutiny uvnitř potrubí se rozdíly rychlosti proudění v různých místech průřezu snižují a jsou menší, než rozdíly proudění laminárního proudění mimo oblast stěny trubky. Na základě experimentálních měření bylo zjištěno, že u turbulentního proudění vzniká v blízkosti obtékaného tělesa tzv. laminární podvrstvy s tloušťkou několik desetin milimetru. Oblast mezi touto laminární podvrstvou a turbulentním prouděním pak tvoří přechodová oblast, která sama o sobě tvoří další oblast s turbulentním proudem.

Turbulentní proudění se nevyskytuje jen při průtoku tekutiny uzavřeným potrubím (vnitřní prostředí) ale i při samotném obtékání různých těles (vnější prostředí). [8] [18]

### 3.5 Šíření tepla

Základní veličinou týkající se tepla a jeho přenosu mezi látkami je termodynamická teplota, označována symbolem  $T$ . Je jednou ze sedmi základních jednotek SI a její hodnota je vyjádřena v Kelvinech. Pro přepočítání na teplotu  $t$  ve stupních Celsia je nutné odečíst hodnotu 273,15.

$$T[K] = \vartheta[^\circ C] + 273,15 \quad (3.8)$$

K přenosu tepla dochází v prostředí, které je vyplněno látkou. Šíření tepla je umožněno na základě pohybu částic hmoty. Vzájemným působením mezi jednotlivými částicemi dochází ke srážkám, a tudíž k předání kinetické energie. Čím vyšší teplotu látka má, tím větší je její kinetická energie částic. Ke srážkám dochází tak dlouho, dokud nedorazí k vyrovnaní teplot.

Přenos tepla nebo také sdílení tepla je složitý děj. K jeho popisu zavádíme řadu zjednodušení, která usnadňují tvorbu modelu pro matematický popis dějů. Přenos tepla můžeme rozdělit na tři typy:

- šíření tepla vedením (kondukcí)
- šíření tepla prouděním (konvekci)
- šíření tepla sáláním (zářením, radiací)

Přenos tepla v reálných situacích různých zařízení je obvykle kombinace dvou nebo i všech tří uvedených typů přenosu tepla.

#### 3.5.1 Vedení tepla (kondukce)

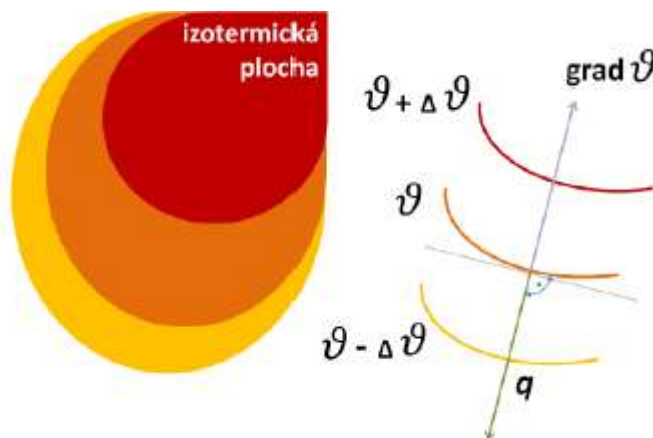
Při vedení tepla částice látky v oblasti s vyšší teplotou předávají část své střední energie prostřednictvím srážek částicím v místech s nižší teplotou. Tento princip popisuje druhý zákon termodynamiky. Částice se při tomto procesu nepřemísťují, ale pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. S šířením tepla vedením se nejčastěji setkáme v tělesech z pevných látek, ale může se tak šířit i v kapalinách a plynech. [6] [8]

Základním předpokladem pro šíření tepla vedením je tedy existující rozdíl teplot, který lze popsat matematicky jako

$$\vartheta = f(x, y, z, t) \quad [K], \quad (3.9)$$

kde souřadnice  $x, y$  a  $z$  jsou souřadnicemi teplotního pole a symbol  $t$  znázorňuje závislost děje na čase. Pokud je děj časově proměnlivý, jedná se o nestacionární vedení tepla. Následující rovnice jsou uvažovány v souvislosti se stacionárním vedením tepla. Teplotní pole je tvořeno izotermickými plochami, tedy plochami, ve kterých je dosaženo stejné teploty.





Obr. 3.5: Schéma složení teplotního pole a jeho izotermických ploch. [19]

Nárůst teploty tělesa měnící se všemi směry je vyjádřen gradientem teploty, který představuje vektor kolmý na izotermickou plochu a směřující k místu nárůstu teploty. Gradient teploty je vyjádřen

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \nabla \vartheta \quad [K \cdot m^{-1}], \quad (3.10)$$

kde  $\nabla$  představuje diferenciální operátor nabla vektorové analýzy.

Přestup tepla  $Q$  vedený skrze izotermickou plochu  $S$  za jednotku času je definován jako teplotní tok  $P$ . Jeho vzájemný vztah s hustotou tepelného toku  $q$ , která je vyjádřena tepelným tokem vztaženým k velikosti izotermické plochy, je reprezentován rovnicí

$$P = q \cdot S \quad [W], \quad (3.11)$$

Celkové množství tepla  $Q$ , které projde izotermickou plochou, je možné vyjádřit součinem tepelného toku a času v rovnici

$$Q = P \cdot \tau = q \cdot S \cdot t \quad [J], \quad (3.12)$$

První Fourierův zákon, který souvisí se znalostí teplotního pole, říká, že vektor hustoty tepelného toku  $q$  je úměrný gradientu teploty  $\text{grad } \vartheta$  a má opačný směr. Rovnice popisující vedení tepla pomocí Fourierova zákona je

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta = -\lambda \cdot \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (3.13)$$

kde symbol  $\lambda$  představuje součinitel tepelné vodivosti  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ .

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  je fyzikální parametr, který závisí na teplotě, tlaku a chemickém složení dané látky. Jeho hodnota je důležitá zejména jako vstupní veličina numerických výpočtů simulací s tepelnými ději, jako jsou přestupy v tělesech a mezi nimi. Lze ho definovat množstvím tepla  $Q$  procházejícím jednotkovou plochou izotermické plochy  $S$  za jednotku času  $\tau$ , přičemž je v tělese jednotkový gradient  $\vartheta$ . Matematické vyjádření této definice je pak

$$\lambda = - \frac{Q}{\text{grad } \vartheta \cdot S \cdot \tau} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], \quad (3.14)$$

Platnost prvního Fourierova zákona platí pouze v případech se stacionárním vedením tepla, které se s časem nemění. Nestacionárním vedením tepla, při kterém se teplo šíří tělesem v určitém čase, se zabývá druhý Fourierův zákon, jehož rovnice řeší vztah 3.9.

Jeho matematický popis vychází ze zjednodušených předpokladů:

- tuhé těleso, které vede teplo, je homogenní a izotropní
- fyzikální vlastnosti tělesa jsou konstantní
- vnitřní objemové tepelné zdroje jsou rozmístěny rovnoměrně
- jedná se o izobarický děj

Odvození Fourierovy - Kirchhoffovy rovnice dosáhneme pomocí dosazení obecné diferenciální rovnice energie do prvního Fourierova zákona, která je

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + q_V, \quad (3.15)$$

kde  $\rho$  je hustota tekutiny,  $c_p$  je měrná tepelná kapacita a  $q$  značí hustotu tepelného toku.

Jednotlivé složky hustoty tepelného toku v jednotlivých stěnách, které dohromady tvoří elementární objem tělesa pro výpočet Fourierovy rovnice, jsou

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (3.16)$$

S dosazením jednotlivých složek hustoty tepelného toku je možné rovnici přepsat do podoby

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + q_V, \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{q_V}{\rho \cdot c_p} \quad [K \cdot s^{-1}], \quad (3.18)$$

jež je možné upravit do finálního tvaru Fourier-Kirchhoffovy rovnice pro výpočet vedení tepla jako nestacionárního děje, a to

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \vartheta + \frac{q_V}{\rho \cdot c_p} \quad [K \cdot s^{-1}], \quad (3.19)$$

kde  $\nabla^2$  představuje Laplaceův diferenciální operátor vektorové analýzy. Ten je definovaný jako divergence gradientu pro dané skalární nebo obecně tenzorové pole, přičemž symbol  $a$  označuje součinitel teplotní vodivosti. [19]

### 3.5.2 Proudění tepla (konvekce)

Se změnou teploty se mění také hustota látky, což vyvolává proudění. Konvekce probíhá v prostředích s prouděním, kde dochází zároveň k výměně tepla. Ke sdílení tepla prouděním dochází například v situaci, kdy pevná látka přichází do styku s kapalinou nebo plynem. Dochází tak k ochlazování nebo ohřívání tenké vrstvy

tekutiny při stěně pevné látky, jež má teplotu vůči tekutině menší nebo větší. Vzniklý teplotní rozdíl způsobuje v tekutině přirozené proudění. Přestup tepla je dán součinitelem přestupu tepla, který stanovuje intenzitu výměny tepla na rozhraní tekutiny a stěny. S rostoucím součinitelem dochází k intenzivnějšímu přestupu tepla.

Šíření tepla prouděním je téměř vždy spojeno se šířením tepla vedením. Často je uváděn pojem kondukčně - konvekční přestup tepla. Poměr kondukce a konvekce závisí na celkovém přestupu tepla, druhu proudění a fyzikálních vlastnostech proudící tekutiny. Obecně platí princip, že čím intenzivnější pohyb molekul, tím je podíl sdílení tepla vedením menší. [6] [19]

Konvekci je možno dle typu původce ovlivňování proudění tekutiny rozdělit na dva typy šíření tepla:

- **Přirozená konvekce** - nejčastěji je vyvolána působením gravitačního pole na nerovnoměrně prohřívanou tekutinu.
- **Nucená konvekce** - vyvolána externím zásahem do tekutiny (např. ventilátor).

Jejich poměr se odvíjí od dosažené rychlosti kapaliny. Čím menší rychlosti zahřívána kapalina dosahuje, tím je podíl přirozené konvekce větší.

Teplotní pole proudící tekutiny popisuje již zmíněná Fourierova - Kirchhoffova rovnice. Ta platí za předpokladu že se proudění uskutečňuje v homogenním izotropním poli s konstantními fyzikálními vlastnostmi a s rovnoměrně rozprostřenými vnitřními objemovými zdroji. Ztrátové teplo se pro zjednodušení výpočtu zanedbává a děj se odehrává za konstantního tlaku.

Rovnici energetické rovnováhy při izobarickém tlaku pro vedení tepla tuhým tělesem lze matematicky vyjádřit

$$\rho \cdot \frac{\partial i}{\partial \tau} = -\operatorname{div} q + q_v \quad [W \cdot m^{-3}], \quad (3.20)$$

kde  $q$  představuje hustotu tepelného toku s měrnou jednotkou  $W \cdot m^{-2}$ . Hodnotu  $\operatorname{div} q$  lze vyjádřit jako

$$\operatorname{div} q = -\lambda \cdot \operatorname{grad} t, \quad (3.21)$$

Při odvození této rovnice vycházíme z prvního Fourierova zákona vedení tepla (rovnice 3.13). V důsledku pohybujícího vedení tepla je třeba rovnici rozšířit na

$$q = -\lambda \cdot \operatorname{grad} \vartheta + \rho \cdot v \cdot i \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (3.22)$$

kde  $\rho$  je hustota tekutiny,  $v$  je její rychlost a  $i$  představuje měrnou entalpii. Entalpie je fyzikální veličina označovaná písmenem  $H$ , která je udávána v joulech a vyjadřuje energii uloženou v termodynamickém systému. Jedná se o jeden ze čtyř základních termodynamických potenciálů.

Složky hustoty tepelného toku pro jednotlivé směry proudění jsou vyjádřeny

v rovnicích:

$$\begin{aligned} q_x &= -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \rho \cdot v_x \cdot i; \quad q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \rho \cdot v_y \cdot i; \\ q_z &= -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial z} + \rho \cdot v_z \cdot i \quad [W \cdot m^{-2}] \end{aligned} \quad (3.23)$$

Dosazením jednotlivých složek hustoty tepelného toku do rozšířené rovnice energické rovnováhy za předpokladu, že součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  a hustota tekutiny  $\rho$  je konstantní, dostaneme tvar

$$\begin{aligned} \rho \cdot \frac{\partial i}{\partial t} &= \lambda \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) - \rho \left( v_x \cdot \frac{\partial i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial i}{\partial z} \right) \\ &\quad - \rho \cdot i \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + q_V \quad [W \cdot m^{-3}]. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Při dodržení rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu platí  $\text{div } v = 0$ . Po úpravě zjednodušení rovnice dostává tvar

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial i}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial i}{\partial z} \right) = \lambda \cdot \nabla^2 \vartheta + q_V \quad [W \cdot m^{-3}]. \quad (3.25)$$

Rovnici lze dále upravit pro izobarický děj, kdy platí  $\partial i = c_p \cdot \partial t$ . Po dosazení přechází rovnice na tvar

$$\frac{\partial i}{\partial t} + \left( \frac{\partial i}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial i}{\partial z} \right) = a \cdot \nabla^2 \vartheta + \frac{q_V}{c_p} \cdot \rho \quad [K \cdot s^{-1}]. \quad (3.26)$$

[19]

### 3.5.3 Sálání tepla (záření, radiace)

Sálání se povahově liší od dvou předchozích typů přenosu tepla, neboť tepelná energie se může přenášet i v prostoru, ve kterém není vzduch, tedy není vyplněn hmotou (vakuum). Sálání představuje elektromagnetické záření, jež se šíří mezi jednotlivými tělesy rychlostí světla. Princip radiace spočívá ve vysílání a následném pohlcování záření, které vede ke zvýšení vnitřní energie v látce, jež záření absorbovala. Sálání je přirozená vlastnost těles, při které každé těleso záření vysílá. Dopadající záření je částečně pohlceno, část se odráží a část prochází tělesem. Pohltivost a odrazivost záření závisí především na jakosti a barvě povrchu tělesa. [6]

Energie záření je úměrná frekvenci  $f$  a Planckově konstantě úměrnosti  $h$ . Rovnicí energie záření je tedy součin

$$Q = h \cdot f \quad [J]. \quad (3.27)$$

Kvantum energie, která je buď vyzářena nebo pohlcena, se nazývá foton. Ty se chovají jako částice šířící se rychlostí světla s hmotností  $m$ , která je vyjádřena vztahem

$$m = \frac{Q}{c^2} = \frac{h \cdot f}{c^2} \quad [kg], \quad (3.28)$$

kde symbol  $c$  zastupuje hodnotu rychlosti světla.

Hybnost fotonu o určité hmotnosti je možno vyjádřit pomocí matematického zápisu

$$p = m \cdot c = \frac{Q}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad [kg \cdot m \cdot s^{-1}]. \quad (3.29)$$

Vyzáření energie se zvyšuje s rostoucí frekvencí či klesající vlnovou délkou, která se od hodnoty frekvence odvíjí.

Celkové množství vyslané energie také závisí na teplotě tělesa. Těleso, které při určité teplotě vyzařuje či pohlcuje na každé vlnové délce maximální možné množství sálavé energie, je označováno jako těleso černé. Rovnováha vyzařování a pohlcování, tedy nezávislost vyslané energie na chemickém složení tělesa, ale čistě jen na teplotě, nastává v absolutně černém tělese. To ovšem ve skutečnosti nemůže existovat, proto všechna tělesa jsou tělesa šedá.

V praxi se k popisu záření šedých těles používá matematický výraz

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (3.30)$$

kde  $C_0$  zastupuje součinitel vyzařování černého tělesa  $C_0 = 5,67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  a symbol  $E_0$  představuje Stefanův - Boltzmannův zákon, který určuje celkové záření povrchu tělesa do všech směrů poloprostoru,  $E_0 = \sigma \cdot T^4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}]$ . Stefanův - Boltzmannův zákon říká, že intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty  $T$  zářícího tělesa.

Závislost mezi emisivitou a pohltivostí těles popisuje Kirchhoffův zákon. Pro černá i šedá tělesa platí, že při tepelné rovnováze je pohltivost tělesa rovna jeho emisivitě. To lze vyjádřit vztahem

$$A = \varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{E}{\sigma \cdot T^4} \quad [-]. \quad (3.31)$$

Rovnost platí také, když šedé těleso není v tepelné rovnováze s okolím  $A = \varepsilon$ . Rovnost platí i při změně teploty šedého tělesa, při které se emisivita a pohltivost tělesa může změnit. [19]

## 4 TEMPEROVANÁ PODLOŽKA

Abychom dosáhli lepšího uchycení první nanesené vrstvy a vyvarovali se deformacím modelu, bývá součástí tiskárny vestavěná vyhřívaná podložka. Extrudovaná vrstva plastu po chvíli chladne a začíná se smršťovat. Jelikož k procesu chlazení, a tedy i smršťování nedochází v celé tištěné části rovnoměrně, dochází tak na okrajích modelu k odchlípnutí od podložky a dalším deformacím. Tisk s pomocí vyhřívané platformy umožňuje zachovat teplotu produktu tak, aby nedocházelo k nerovnoměrnému smršťování, posuvům modelu či vnitřnímu prnutí v materiálu. K těmto deformacím dochází zejména při použití materiálu ABS.

Aby byl tisknutý model dostatečně prohříváný, je vhodné teplotu podložky nastavit na teplotu 60 až 110°C podle používaného materiálu pro tisk. Proto by podložka měla mít schopnost regulace teploty a pro kontrolu a přesnější nastavení teploty by měla mít instalované teplotní čidlo. Pokud by docházelo na desce ke kolísání teploty, mělo by to špatný důsledek na tvar produktu. Důležitým faktorem je, aby podložka byla vyhřívána rovnoměrně a model byl vyhříván v každé své části stejně. Vyhřívání desky může být realizováno třemi způsoby. [16]

### 4.1 Temperovaná podložka realizována rezistory

Prvním z nich je realizace výkonovými rezistory. Jako stavební základ této podložky je obvykle hliníková deska s tloušťkou okolo 5mm. Rezistory jsou k desce buď přišroubovány, nebo přilepeny dvousložkovým lepidlem s kovovým plnivem, které odolá teplotám do 120°C. Při montování rezistorů je důležité dosáhnout dobré tepelné vodivosti. Abychom dosáhli rovnoměrného prohřátí desky, je vhodné rovnoměrně umístit větší množství rezistorů, například v soustavě 3x3 rezistory na čtvercovou desku. Na vrchní část vyhřívání podložky se používá nejčastěji sklo, které vytváří hladký povrch, neohýbá se a je snazší na údržbu. Nevýhodou skleněné podložky je její váha a křehkost, kdy může dojít k prasknutí podložky. Výhodou oproti kovovým podložkám je její pořizovací cena. [16]

### 4.2 Temperovaná podložka realizována měděným drátem

Druhou variantou je realizace podložky měděným drátem. Měděný drát je přilepen na skleněnou desku pomocí vysokoteplotní kaptonové pásky. Odpor topného tělesa při použití drátu můžeme měnit tloušťkou a délkou měděného drátu, který bývá napájen 12V. Nevýhodou tohoto řešení je, že není možné navinout drát s vysokou hustotou závitů a že může zahříváním dojít k delaminaci drátu od podložky. [16]

### 4.3 Temperovaná podložka realizována plošným spojem

Nejvýhodnější a nejvíce rozšířenou je proto konstrukce klasické desky plošných spojů s meandrem typu FR4, kde snadno dosáhneme vysoké hustoty závitů a tím dostaneme celoplošné konstantní vyhřívání podložky. Jako zdroj tepla je zde využíván vlastní odpor plošných spojů. Výhodou této podložky je její snadná montáž a nízká pořizovací cena. DPS je pokryta měděnou fólií o tloušťce 35μm a závity jsou tvořeny s rozestupy 20 μm. Aby nedocházelo k přehřívání desky, je nutné dodržet konstrukční parametry desky. Často bývá uprostřed desky umístěn termistor pro monitorování produkované teploty. Samotná deska je napájena 12V a při odběru proudu 10A je vyhřívána až na teploty 100-110 °C, přičemž materiál FR4 je dimenzován na vydrž teploty až 140°C. Hotová deska se pak připevňuje ke sklu pomocí svorek, aby byl kontakt pro přestup tepla co nejtěsnější.

Simulace teplotního profilu takové temperované podložky je založena na principu Jouleova tepla, které vzniká při průchodu elektrického proudu vodičem. Elektrony při průchodu předávají část své kinetické energie ostatním částicím vodiče (kladné ionty), které se neúčastní přenosu proudu. Tím vzniká zvýšený tepelný pohyb těchto částic a vodič se zahřívá. Pro velikost Jouleova tepla vznikajícího ve vodiči, kterým prochází elektrický proud po určitou dobu, platí

$$Q = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t, \quad (4.1)$$

kde  $Q$  je velikost Jouleova tepla,  $P$  je výkon,  $t$  je doba průchodu elektrického proudu,  $U$  je napětí vodiče,  $I$  je proud tekoucí vodičem a  $R$  je odpor vodiče.

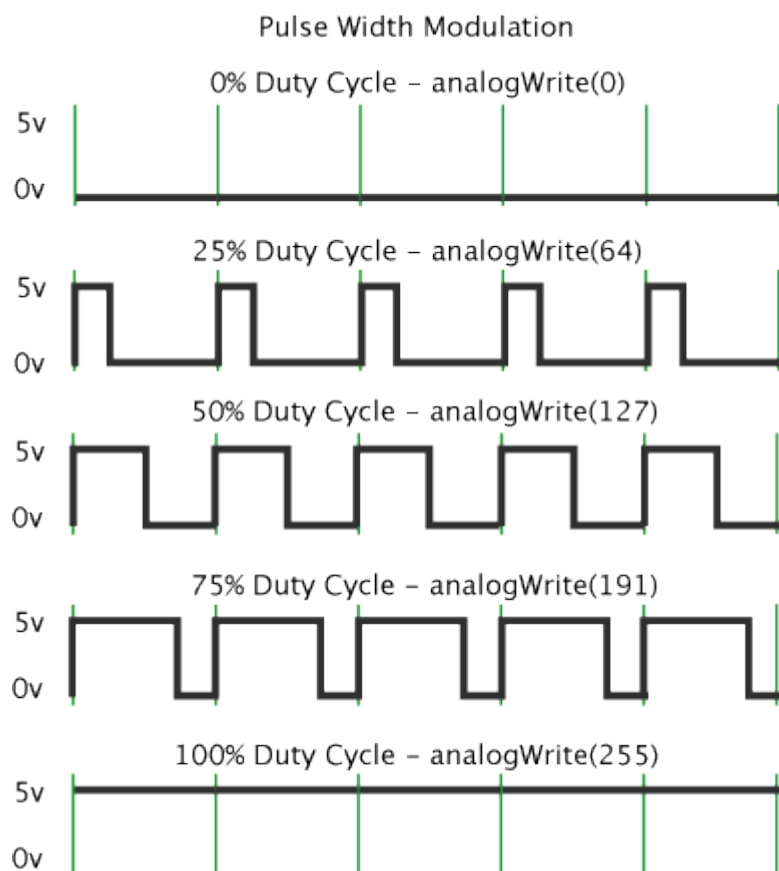
Jouleovo teplo má koeficient výkonu roven jedné. To znamená, že každý 1 watt elektrické energie je přeměněn na 1 joule tepla. [6] [16]

#### 4.3.1 Způsob řízení teploty na podložce a trysce

O prohřívání temperované podložky spolu s hrotem trysky se stará pulzně šířková modulace (PWM - Pulse Width Modulation), která využívá dostatečně velkých tranzistorů typu MOSFET a nízkého kmitočtu (100Hz - 1kHz). PWM je diskrétní modulace sloužící k přenosu analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu. Přenášenou veličinou může být například napětí, proud, nebo i světelný tok. Signál je přenášen se střídou, u které se mění poměr délky impulzu zapnuto k délce mezery vypnuto. Cyklus, při kterém je přenesena jedna střída, tedy součet obou stavů, se nazývá perioda. Ta se může uvádět jako číselný poměr nebo procentuálně. K demodulaci signálu stačí použít frekvenční dolní propust. Vzhledem k vlastnostem PWM je tato modulace signálu často využívána ve výkonové elektronice pro řízení velikosti napětí nebo proudu. [6]

Přenášený modulovaný signál obsahující informaci o hodnotě příslušné veličiny nabývá hodnot zapnuto/vypnuto (logická 1/0). Tato hodnota je v přenášeném signálu zakódována jako poměr těchto stavů a nazývá se střídou. Přenos informace o hodnotě je

vždy omezen na relativní vyjádření 0 - 100 %, takže musí být známý vztah mezi skutečnou hodnotou veličiny a jejím procentuálním vyjádřením. Časové intervaly střidy se pohybují v jednotkách sekund až milisekund pro přesnější řízení. [21]



Obr. 4.1: Ilustrační schéma stavů při procentuálním vyjádření střidy 0-5 V. [20]

Nastavení teploty je řešeno s využitím informace z termistoru připojeného přes PWM driver na platformu Arduino, která řídí teplotu z obslužného softwaru tisku spínáním napětí dle potřeby. Pro získání kvalitních informací a správnou regulaci teploty na podložce či trysce je potřeba používat kvalitní a přesné termistory. Nejčastěji se používá termistor typu NTC o odporu 100 k $\Omega$  a maximální pracovní teplotě 300°C.

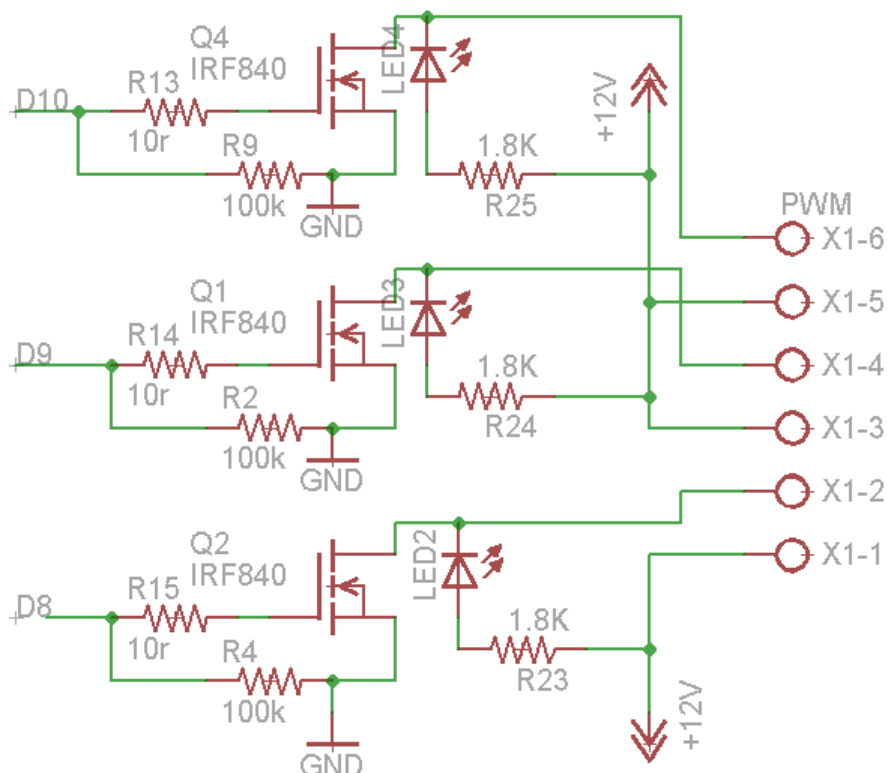
Jako zdroje napětí se u 3D tiskáren typu RepRap používají ATX zdroje z osobních počítačů. Pro napájení temperované podložky je nezbytně nutné, aby zdroj dodával do obvodu s 12V proud o velikosti alespoň 15A.

Maximální teplotu trysky je možné nastavit až na 275 °C, což je mezní hodnota, u které když dojde překročení, vyhřívání je zastaveno, aby se zabránilo jejímu poškození. Většina trysek je opatřena ventilátorem chlazení. Používají se 12V ventilátory, které jsou také řízeny PWM modulací. [6]



### 4.3.2 PWM hardware

Všechny tyto výstupy pro temperovanou podložku, vyhřívaný hrot trysky a napájení případných ventilátorů nelze napojit přímo na ovládací platformu Arduino Mega 2560 z důvodu velkého odběru proudu. K připojení a za účelem proudového posílení všech výstupů pro PWM regulaci je připojena deska obvodu s tranzistory MOSFET STP55NF06L, které pokryjí nároky na proudový odběr všech připojených zařízení. [6] [20] [22]



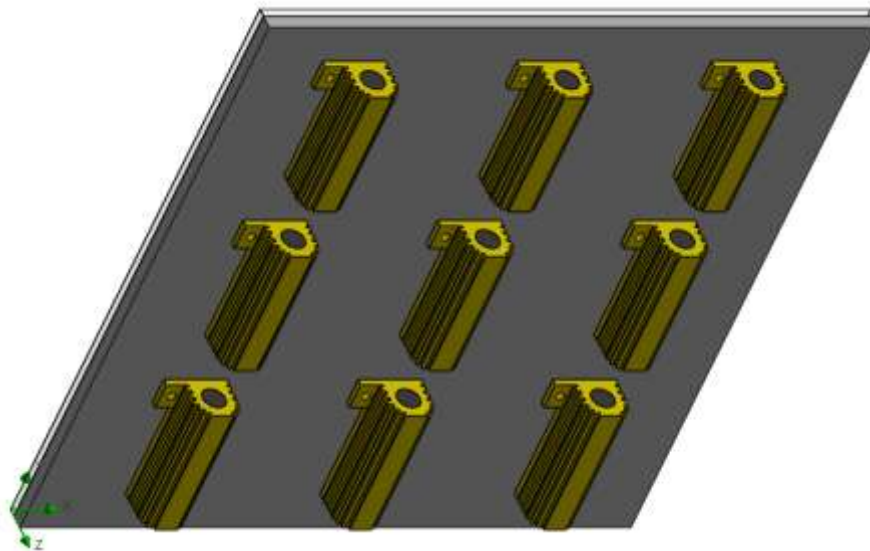
Obr. 4.2: Výkonové posílení výstupů pro PWM regulaci zařízení. [6]

## 5 SIMULACE

Tato kapitola se věnuje simulacím a jejich analýze temperovaných podložek vhodných pro 3D tiskárnu typu delta pi. Simulace vedou ke správnému návrhu rozložení jednotlivých prvků a následné optimalizaci vyhřívání. Simulovány jsou dva typy rozložení pro podložku s využitím výkonových rezistorů a dva typy pro vyhřívání meandrem na DPS. Virtuální modely a jejich simulace jsou provedeny programem SolidWorks Flow Simulation.

### 5.1 Temperovaná podložka s využitím výkonových rezistorů

Model výhřevné desky s devíti celoplošně rozmístěnými rezistory HSA507R5J v soustavě 3x3. Vytvořená deska má rozměry 220x220 mm. Rezistory jsou rozmístěny s optimálními vzdálenostmi, aby rovnoměrně pokryly celou plochu desky.



Obr. 5.1: Temperovaná podložka ve tvaru čtverce realizována rezistory.

Nastavení simulace programu SolidWorks Flow Simulation pro analýzu teplotního profilu je použito pro vedení tepla v pevném materiálu (Solid) s externí analýzou (*External Analysis*). Z externí analýzy byly vyloučeny vnitřní prostory a do výpočtu jsou zahrnuty pouze pevné látky.

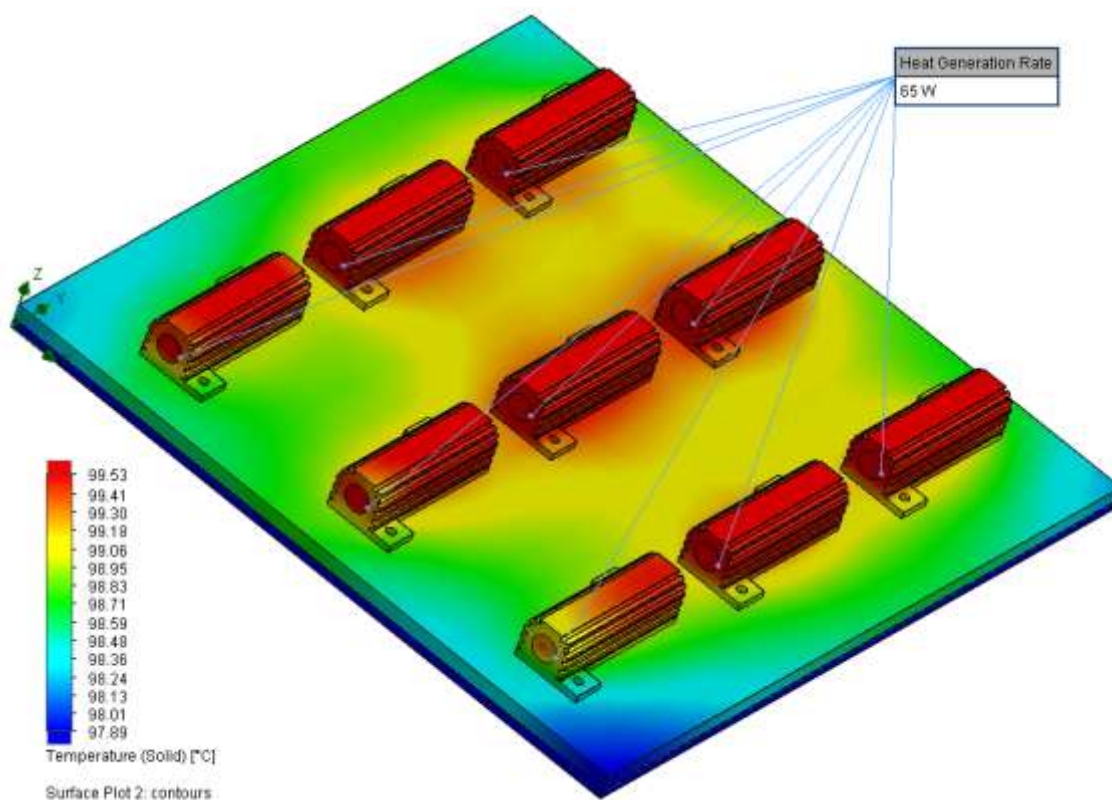
Okrajové podmínky simulace jsou tvořeny zadáním termodynamického tlaku (1013,25 hPa), počáteční teploty (20,05°C) a gravitací zvolenou v ose Z (9,81 ms<sup>-2</sup>).

Použité materiály v modelu jsou voleny, aby co nejlépe splňovaly vlastnosti reálných součástek. Vnitřní část rezistorů je tvořena keramikou 96% oxidu hlinitého.

Tabulka 5.1: Vlastnosti modelových materiálů simulace temperované podložky s rezistory.

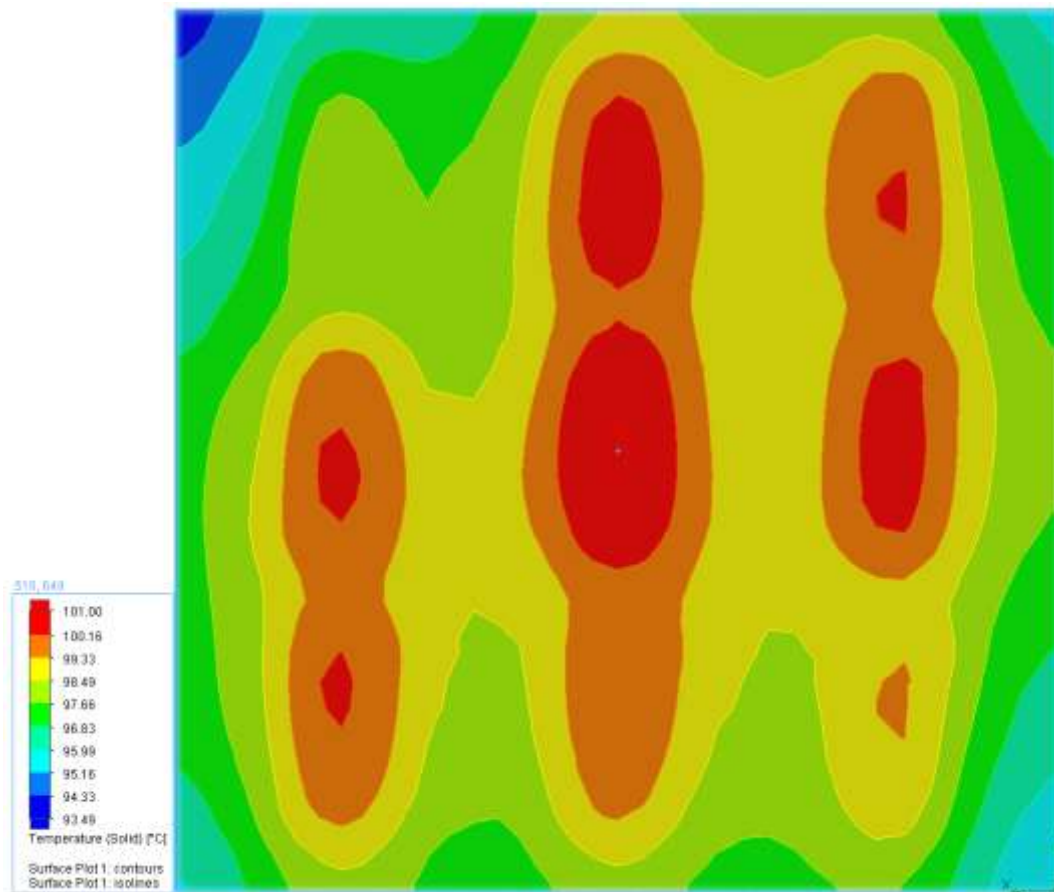
Součást modelu	Zvolený modelový materiál	Měrné teplo [J/kg·K]	Tepelná vodivost [W/m·K]
Nosná deska	Hliník (Al) T=300K	902	237
Jádro rezistoru	Oxid hlinitý 96%	880	24,7
Plášť rezistoru	Bronz T=300K	385	110
Svrchní deska	Sklo	834,61	0,75

Zdroje tepla (*Volume Source*) v simulaci jsou představovány jádra rezistorů, které mají zadaný výkon 65W. Celá deska je prohřátá přibližně rovnoměrně na průměrnou teplotu 98°C.



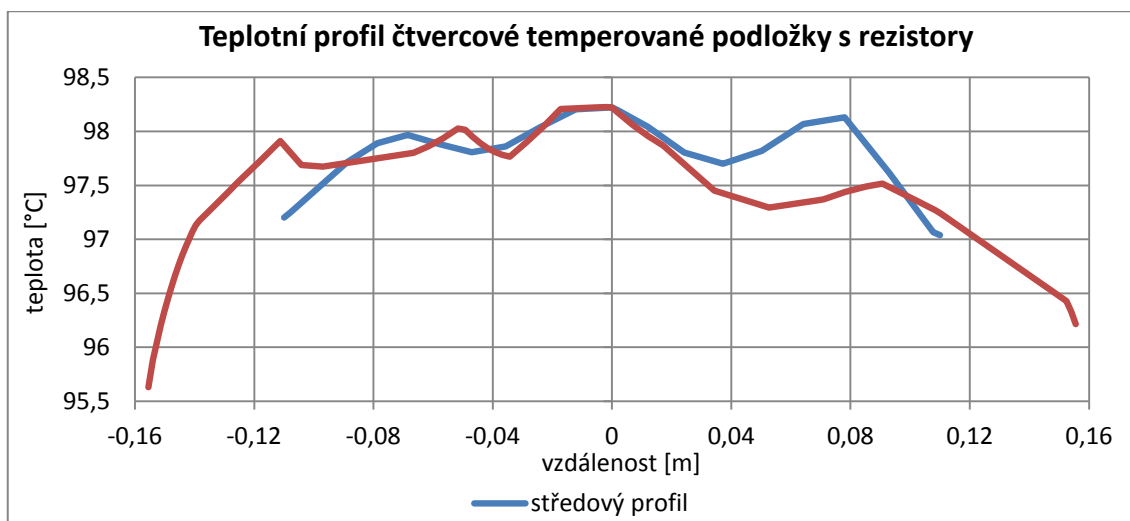
Obr. 5.2: Teplotní profil simulace čtvercové temperované podložky s rezistory.

Při pohledu shora na skleněnou desku vidíme, že místa umístění rezistorů jsou nejvíce ohřátá a prostory kolem nich (Obr. 5.3) jsou, podle barevných kontur simulace, chladnější. Obrázek je mírně zavádějící, protože teplotní rozdíly jednotlivých polí tvoří necelý 1°C. Povrch je tedy přibližně rovnoměrně prohříván po celé jeho ploše.



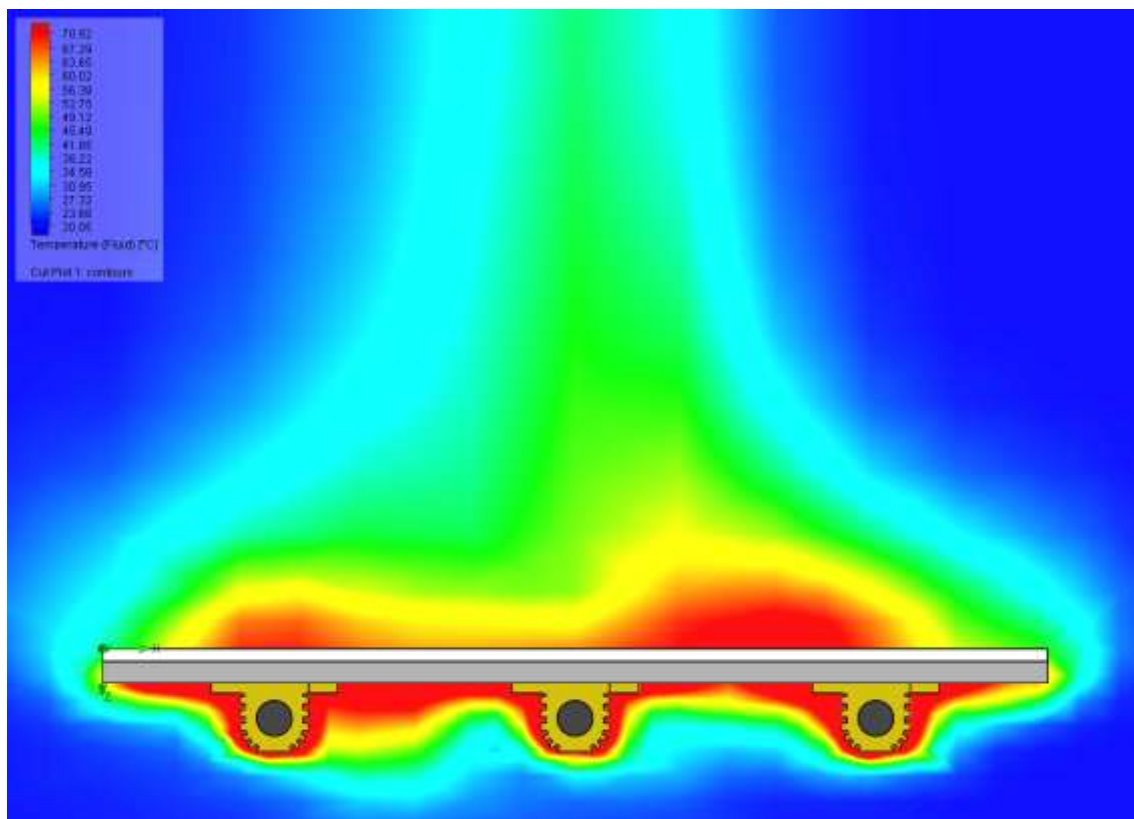
Obr. 5.3: Teplotní profil skelněné desky čtvercové temperované podložky s rezistory

U rezistorů dochází v jejich pláště ke značnému odvodu tepla do okolí. V simulaci je vidět, že svrchní pláště výkonových rezistorů jsou nejvíce prohřívány, zejména pak v oblasti, kde nejsou připojeny k hliníkové nosné desce (Obr. 5.2). Vnikající teplo přestupuje v okolí pevných součástí do fluidního prostoru vzduchu, kde díky definované gravitaci stoupá směrem vzhůru (Obr. 5.5).



Obr. 5.4: Graf teplotního profilu čtvercové temperované podložky s rezistory.

Z grafu teplotních profilů rezistorové čtvercové desky je patrné, že křivka úhlopříčného profilu na svých okrajích klesá více než křivka středového profilu. Teplota v rozích klesá mnohem více než teplota ve středech stran čtverce. Šíření tepla na okrajích desky se postupně snižuje vlivem ochlazování vzduchem v okolí.



Obr. 5.5: Přestup tepla do okolí temperované podložky s rezistory.

V oblasti vzduchu nad temperovanou podložkou se díky přestupu tepla do okolí udržuje teplota okolo 45°C. Oblast v okolí rezistorů má teplotu vzduchu až 70°C, a tak je nutné zabezpečit dobré proudění vzduchu v této oblasti, aby nedocházelo k přehřívání součástí v přítomnosti rezistorů.

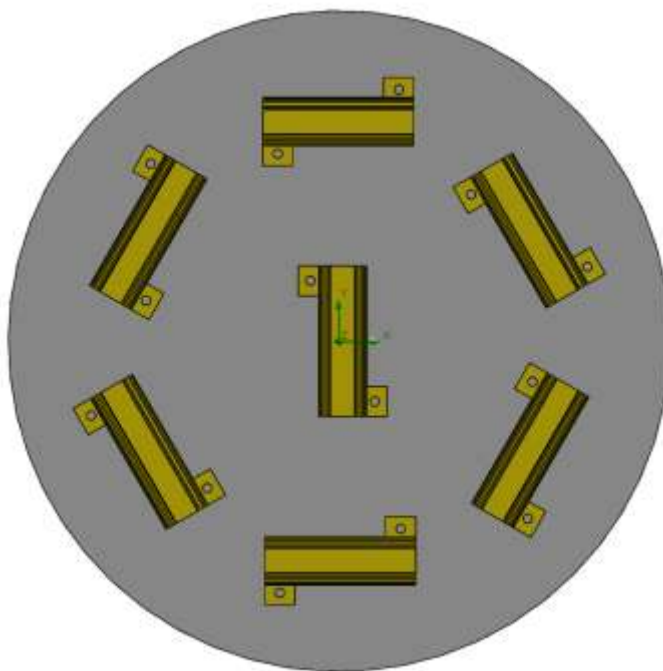
## 5.2 Alternativní realizace temperované podložky v kruhové formě s využitím výkonových rezistorů

Při uvážení tvaru konstrukce tiskárny typu delta pi je možné uvažovat nad použitím temperované podložky s více osově symetrickými tvary. Rozložení tří nosných ramen umístěných ve vrcholech pomyslného rovnostranného trojúhelníka vybízí k návrhu podložky kruhového tvaru.

Výhodou této podložky je menší vytápěná plocha, kterou vyhříváme menším počtem výkonových rezistorů. Šest rezistorů je v tomto případě umístěno v kruhovém uspořádání okolo centrálního rezistoru uprostřed desky (Obr. 5.6). Typy rezistorů jsou

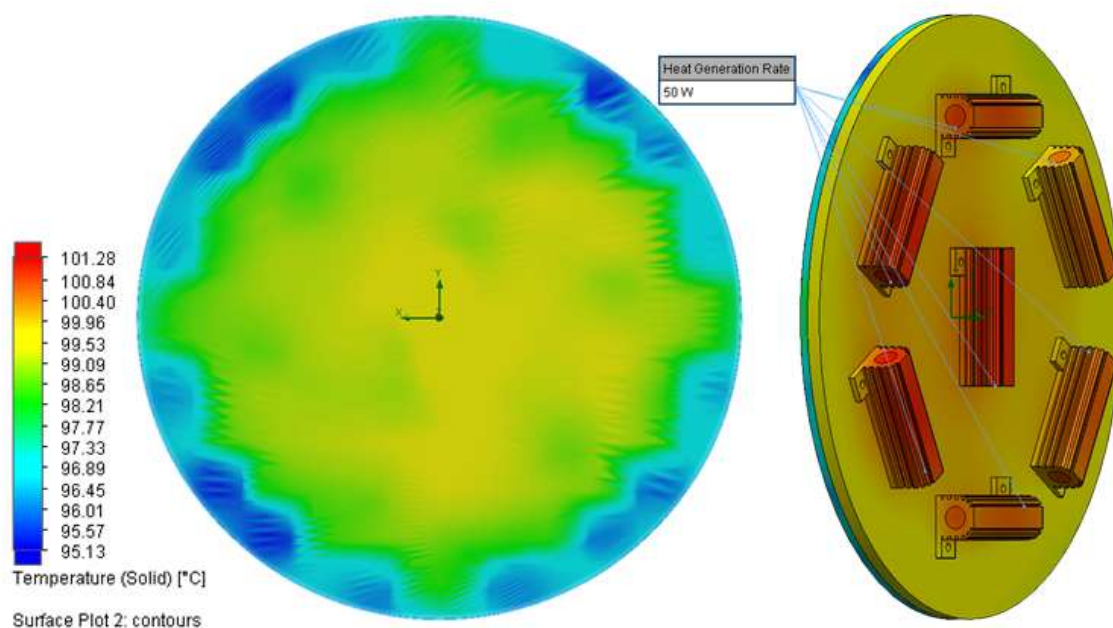


stejně jako u provedení podložky ve tvaru čtverce (typ HSA507R5J, 50W). Průměr kruhu je stejný jako strana čtvercové desky, tedy 220mm.



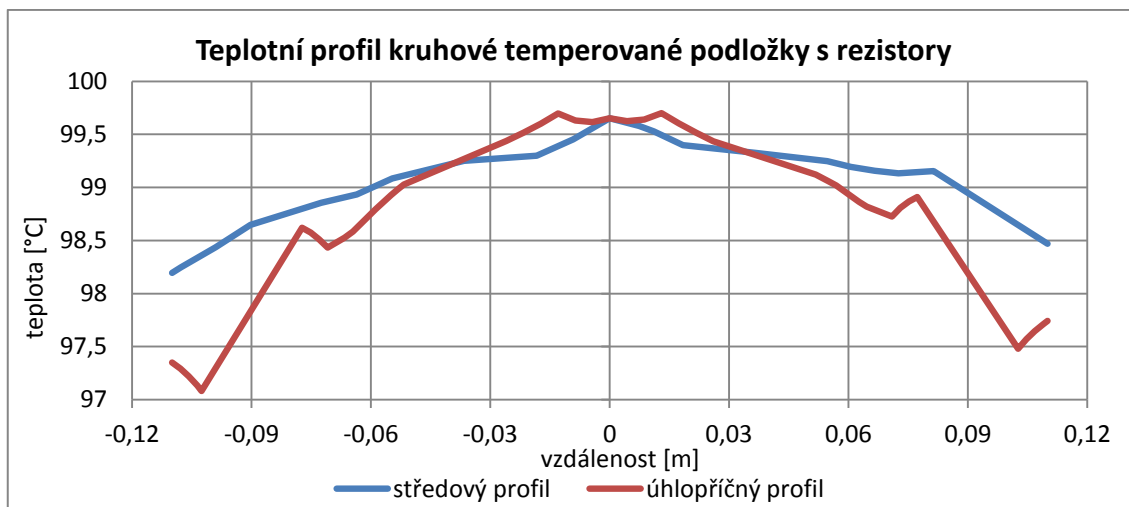
Obr. 5.6: Temperovaná podložka ve tvaru kruhu realizována rezistory.

Nastavení simulace je identické jako v kapitole 5.1. I zde je použita externí analýza a stejné okrajové podmínky. Konstrukční rozměry jsou zachovány z předešlého modelu a charakteristické vlastnosti použitých materiálů jsou stejné (viz tab. 5.1).



Obr. 5.7: Teplotní profil simulace kruhové temperované podložky s rezistory.

Oproti konstrukci podložky čtvercového tvaru potřebujeme nejen menší počet rezistorů, ale i menší výkon (50W) vyhřívání, abychom dosáhli přibližně stejných výsledků prohřátí desky.



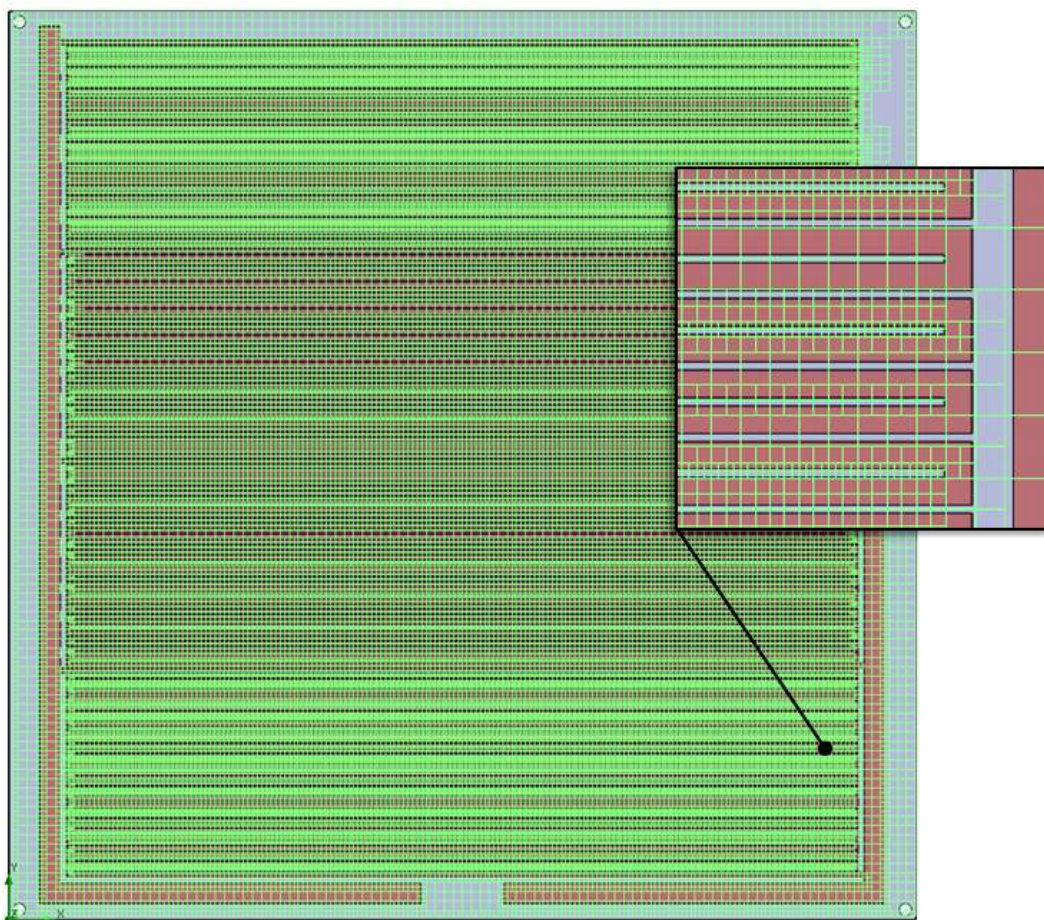
Obr. 5.8: Graf teplotního profilu kruhové temperované podložky s rezistory.

Při porovnání křivek středového a úhlopříčného teplotního profilu je vidět, že teplota v úhlopříčce kruhové oblasti (osa 45°C od osy X) na okraji klesá více než teplota na ose X. Teoreticky by kruhová oblast měla být prohřátá symetricky od středu. Pokles v úhlopříčných směrech je způsoben čtvercovým síťováním, které na okraji desky nebylo zjemněno. Tato chyba simulace je zanedbatelná, jelikož je dosaženo rovnoměrného prohřátí středové oblasti desky.

### 5.3 Simulace temperované podložky s využitím desky plošných spojů - čtvercová realizace

Simulace temperované podložky realizované formou čtvercové desky plošných spojů je prováděna na modelu vytvořeném podle návrhu desky MK2 v programu Eagle. Měděný meandr o šířce 1mm a tloušťce 35μm je nanesen na desku materiálu FR4. Přímou na plochu meandru je přiložena skleněná deska s tloušťkou 3mm. Zemnicí strana není v tomto měření vložena.

Okrajové podmínky simulace zahrnují zvolenou hodnotu přestupu tepla mezi stěnami solidů (*Wall Heat Transfer Coefficient*), která je nastavena na 10W/m<sup>2</sup>/K. Proud v meandru je pak nastaven (*Electrical Condition, Current*) na hodnotu 7A. Úroveň počáteční výpočetní sítě simulace (*Level of Initial Mesh*) je pro dosažení lepších výsledků na malých rozměrech meandru zjemněna z úrovně 3 na úroveň 4.



Obr. 5.9: Základní inicializace zjemnění sítě simulace temperované podložky DPS.

Teplotní analýza má nastavení externí analýzy s vyloučením vnitřních prostor a s vedením tepla pouze v pevných solidech. Materiály solidů v modelu jsou voleny tak, aby co nejlépe charakterizovaly vlastnosti reálných komponentů.

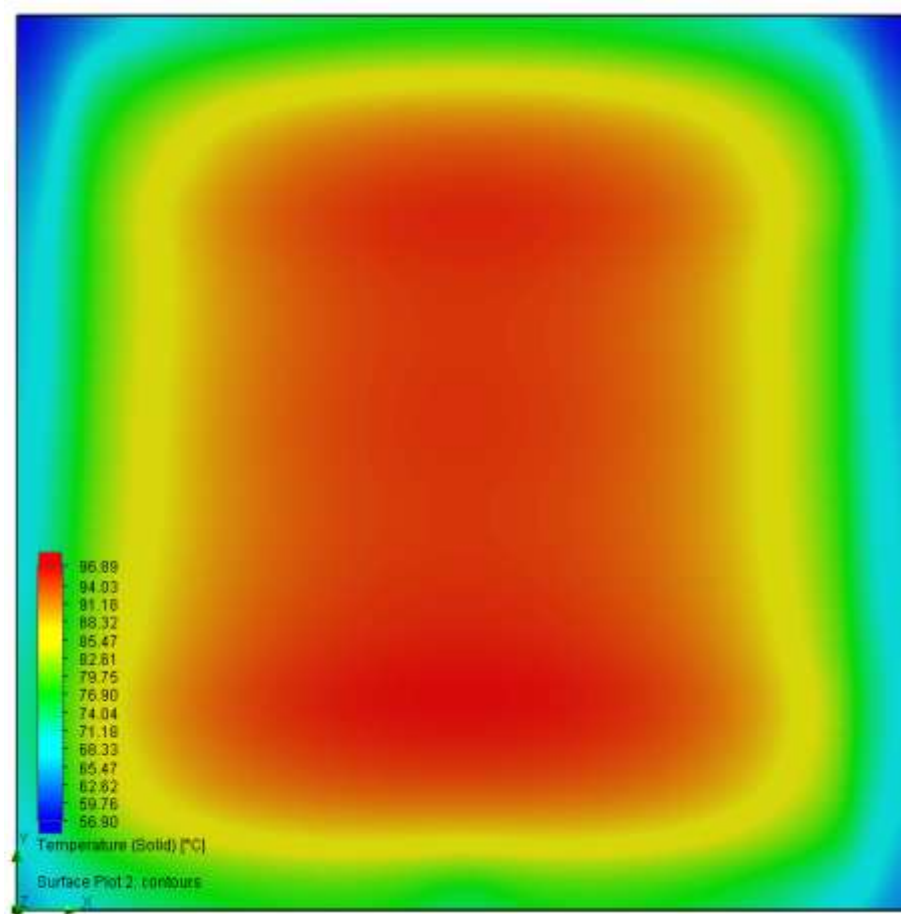
Tabulka 5.2: Vlastnosti modelových materiálů simulace temperované podložky DPS

Součást modelu	Zvolený modelový materiál	Měrné teplo [J/kg·K]	Tepelná vodivost [W/m·K]
Základ desky	FR4	0,3	880
Meandr	Měď (Cu)	390	390
Svrchní deska	Sklo	834,61	0,75

Výsledkem analýzy je teplotní profil na horní straně skleněné desky, jehož znalost je pro 3D tisk zásadní. Jak je vidět na barevných konturách simulace (viz obr. 5.8), celá deska je téměř rovnoměrně prohřívána směrem od středu desky k jejím okrajům. Na okrajích je patrný prudký pokles teplot, jenž je způsoben volnými okraji DPS, kde není naleptán meandr. Pro správný tisk bez deformací je zejména důležitá středová oblast

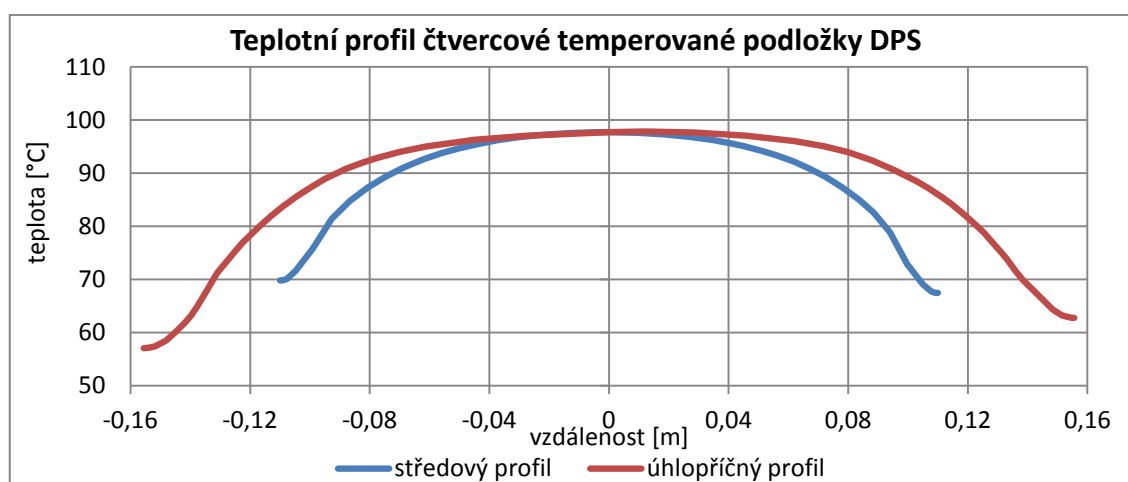


o rozměrech 8x8 mm, která je v tomto případě rovnoměrně prohřívána na 96°C.



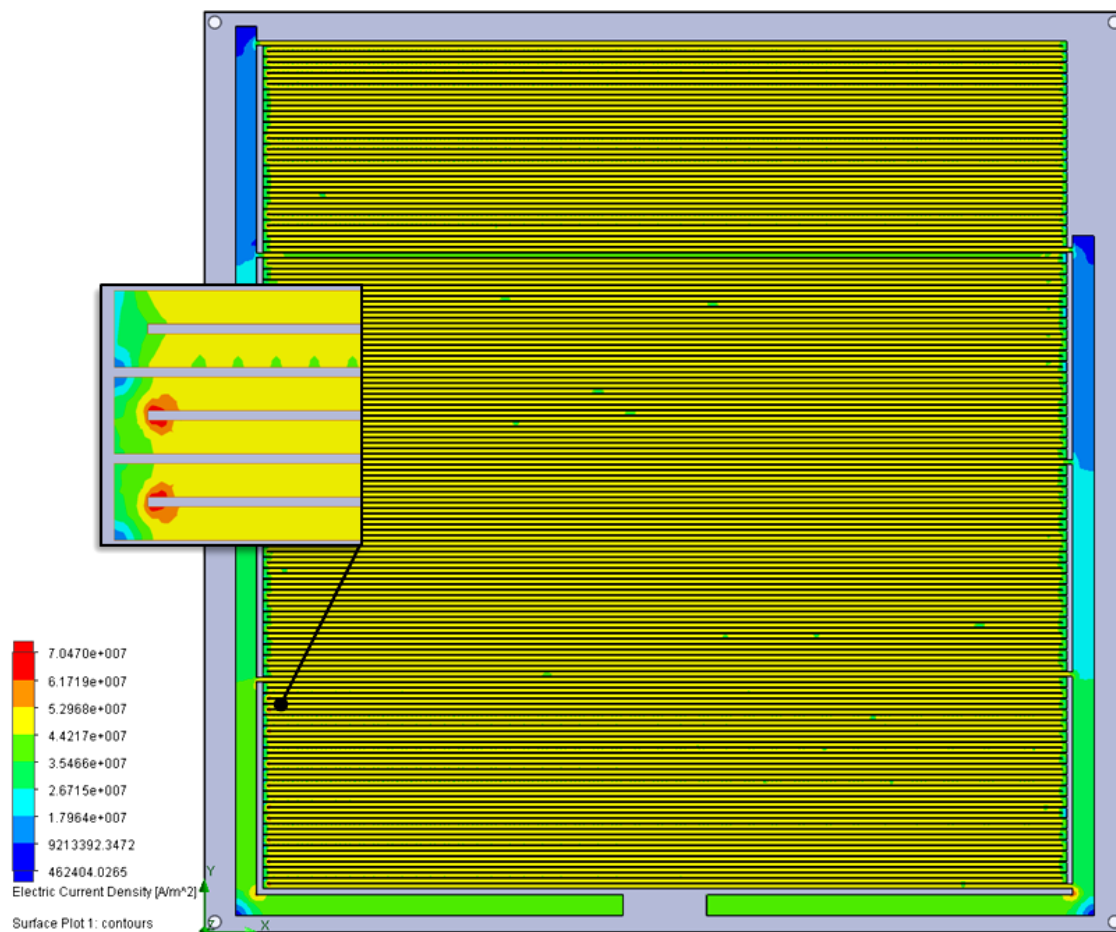
Obr. 5.10: Teplotní profil simulace temperované podložky DPS.

Napětí v meandru DPS podle simulace vychází na 8,03V. Při 7A v obvodu desky dostáváme výkon 56,21W. Optimálně ale bývá článek napájen 12 nebo 24V.



Obr. 5.11: Graf teplotního profilu čtvercové temperované podložky DPS.

Z grafu je názorně vidět rapidně klesající teplota. Při porovnání křivek středového a úhlopříčkového profilu, teplota na úhlopříčce desky se udržuje v rámci vyhřáté plochy čtvercového tvaru s následným vysokým poklesem teploty v rozích desky. Teplota v rozích tak klesá více než o 10°C oproti středům stran.



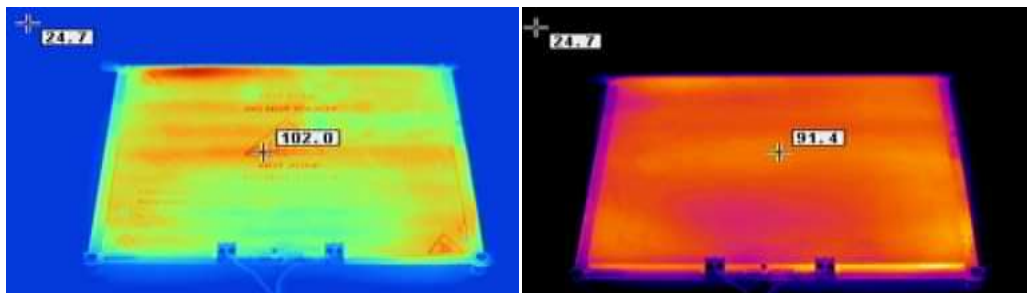
Obr. 5.12: Rozložení proudové hustoty v meandru DPS.

Z obrázku rozložení proudové hustoty v meandru je patrné, že v ohybech obvodu dochází k lokálnímu zvýšení proudové hustoty při vnitřním oblouku. Zelené tečky a celý segment v horní části desky označený zeleně jsou zřejmě výpočtové chyby, které má na svědomí nedostatečné síťování modelu.

### 5.3.1 Prohřívání reálné temperované podložky s využitím desky plošných spojů

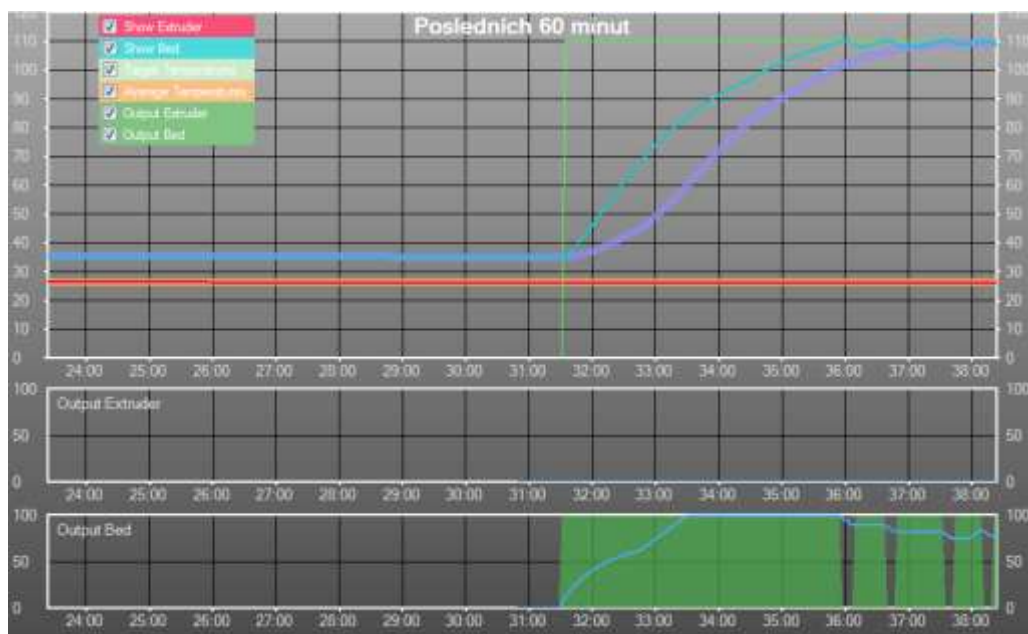
Temperovanou podložku typu MK2, dle které je vytvořen model, jsme nechali prohřívát a výsledek rozložení teploty jsme zaznamenali pomocí termokamery. Vyhřívána podložky byla umístěna na pracovní desku stolu s připevněnými distančními kolíky v rozích. Na dvou snímcích je možné pozorovat prohřívání měděného meandru desky, kdy na druhém snímku je podložka opatřena tiskací skleněnou podložkou. Na

prvním snímku je teplota prohřívání nastavena na 100 °C. Hodnota teploty měřené termokamerou ukazuje na 102 °C a na snímku jsou zároveň vidět červené místa s lokální vyšší teplotou, kde můžou být přítomny defekty. Na snímku s přiloženou skleněnou deskou je cílová teplota zvýšena na 110°C, abychom dokázali sklo lépe prohřát. Teplota na povrchu skla je mnohem více rovnoměrně rozprostřena oproti nezakryté podložce a dosahuje v průměru hodnoty 91 °C.



Obr. 5.13: Snímky tepla termokamerou DPS podložky (vlevo) a s přiloženým sklem (vpravo).

Na grafickém průběhu prohřívání z obslužného programu Repetier (Obr. 5.14) je počátek prohřívání znázorněn zeleným pravoúhlým průběhem, který má horní hranici na cílové teplotě 110°C. Světle modrá křivka znázorňuje informace o postupném vyhřívání desky z termistoru umístěném ve středu spodní strany DPS. O prohřívání se stará spínání zdroje pomocí pulzní šířkové modulace (PWM), jejíž průběh je znázorněn zeleným spektrem v oblasti Output Bed. Prohřívání extruderu není zapnuto, proto je jeho teplota konstantní a oblast Output Extruder nevykazuje žádný výkon na výstupu.

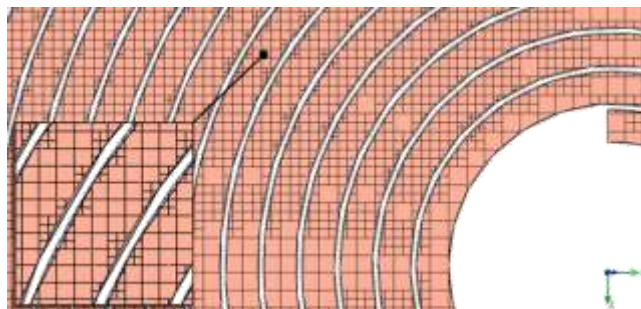


Obr. 5.14: Průběh počátku vyhřívání temperované podložky z obslužného programu Repetier.

## 5.4 Temperovaná podložka s využitím desky plošných spojů - kruhová realizace

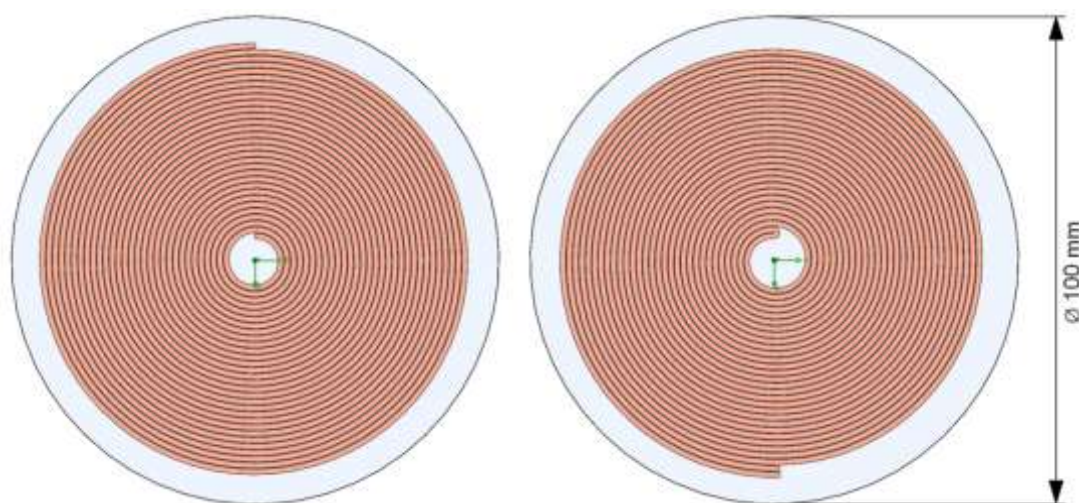
Jak již bylo řečeno u kruhové varianty temperované podložky s využitím rezistorů, kruhová varianta se pro typ delta pi tiskárny hodí z konstrukčního hlediska lépe. V realizaci formou spirálovitého meandru se nabízí dvě varianty. První variantou je jednoduchá spirála s napájecími piny umístěnými ve středu a na okraji desky. Nevýhodou tohoto návrhu je vzdálenost mezi vstupním a výstupním pinem napájení. Druhou variantu tvoří dvojité spirála s obratem ve středu a s praktičtějším umístěním napájecích konektorů na okraji desky.

Simulace kruhového meandru jsou výpočetně velmi náročné kvůli nutnosti rozdělit oblé části více výpočetními buňkami. Jemnější síťování vede k přesnějším výsledkům a jelikož rozestupy stoupání spirály jsou v jednotkách desetin milimetru, síťování je v oblasti oblých linií velmi podrobné.



Obr. 5.15: Síťování modelu kruhové realizace temp. podložky formou DPS

Simulace obou variant jsou pro zkrácení výpočetního času prováděny na zmenšených modelech o průměru 100 mm. Při síťování je ponechána základní úroveň zjemnění (*Level of Initial Mesh - 3*). Modely jsou na této úrovni zjemnění sítě rozděleny v průměru na 450 000 výpočetních buněk.

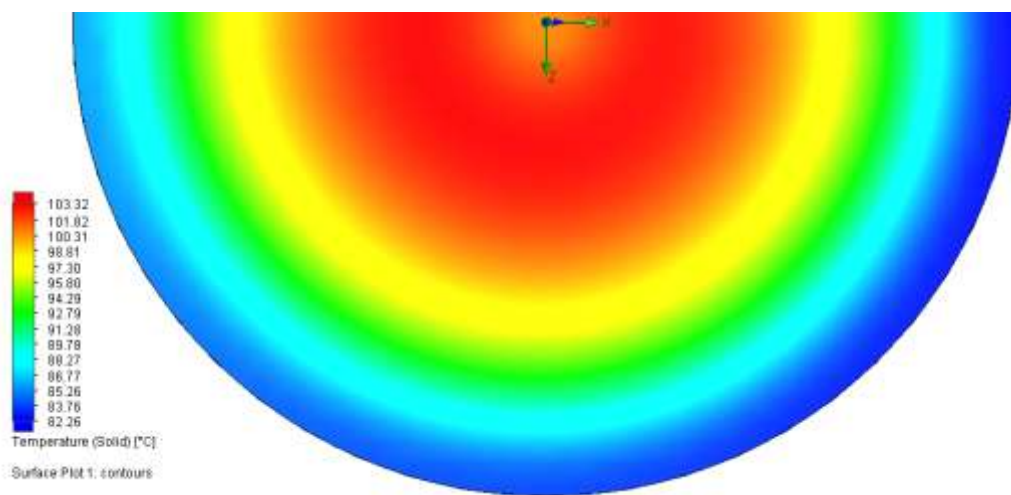


Obr. 5.16: Zmenšené modely spirálových motivů pro temperované podložky DPS



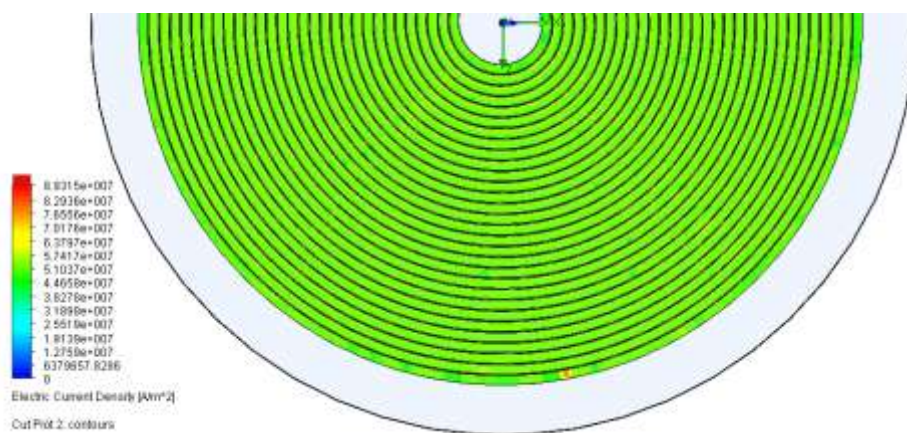
### 5.4.1 Varianta jednoduché spirály DPS

Na výsledku simulace varianty výhřevné podložky, realizované formou motivu jednoduché spirály, je vidět, že se na povrchu skleněné podložky rozkládá teplo v kruzích. Největší intenzitu tepla naměříme ve středové části kruhové plochy a téměř rovnoměrně teplota klesá směrem k okraji desky. V důsledku spirálovitého vedení dochází k menšímu poklesu teplot v levé polovině plochy desky. Rozdíl na levém a pravém okraji je ovšem pouze dva stupně Celsia. Středová oblast dosahuje v simulaci rovnoměrné teploty 100°C s mírným útlumem v geometrickém středu spirály, kde již není motiv veden. Pokles je opět velmi malý v rozmezí dvou stupňů Celsia.



Obr. 5.17: Teplotní profil kruhové podložky DPS vyhříváné jednoduchou spirálou.

Na rozdíl od čtvercové temperované podložky formou meandru DPS je kruhová varianta oproštěna od lokálního zvyšování proudové hustoty, protože se v meandru spirály nenacházejí žádné ohyby, které by zvyšování hustoty způsobovaly.

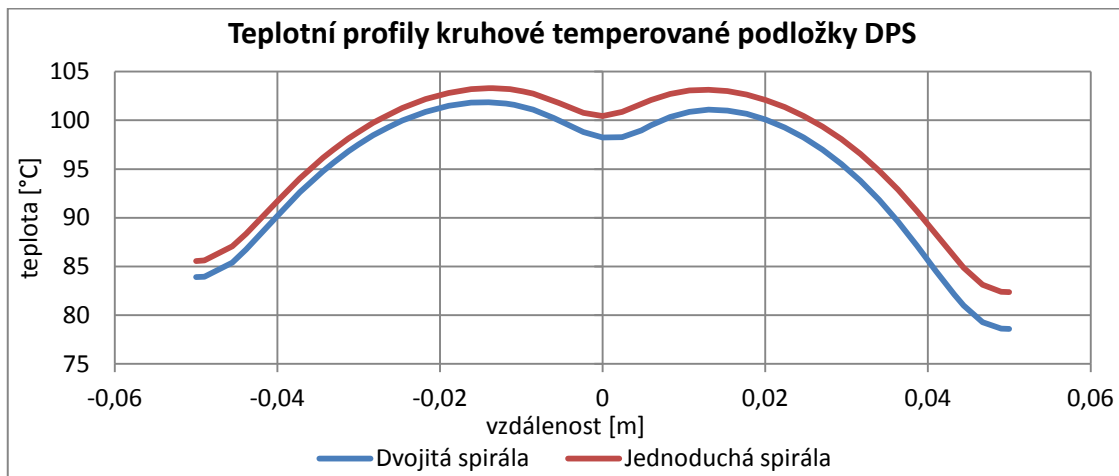


Obr. 5.18: Rozložení proudové hustoty v jednoduché spirále.

Červená oblast ve spodní části posledního závitu je lokální zvýšení proudové hustoty způsobené chybou výpočtu v důsledku nedostatečného síťování oblasti. Tyto drobné chyby simulace jsou zanedbatelné.

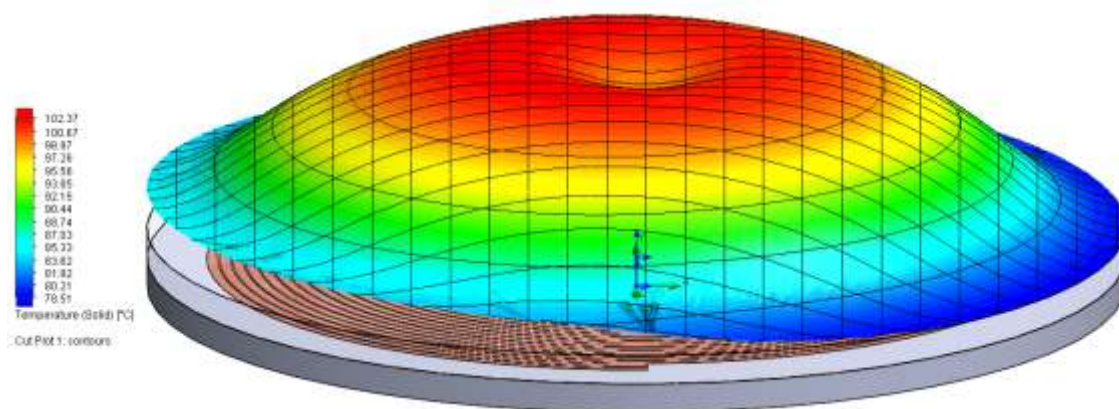
### 5.4.2 Varianta dvojité spirály DPS

Dvojitě vedení spirály přináší jednu velkou výhodu a tou je umístění vstupní a výstupní části měděného motivu v jednom místě. To umožňuje vést napájení temperované podložky DPS jednoduše z okraje kruhové desky a také umožňuje jednoduché připojení LED diod s rezistorem. Odpadá tak nutnost vést druhý konektor drátově mimo oblast desky plošných spojů.



Obr. 5.19: Teplotní profily obou variant kruhové temperované podložky DPS

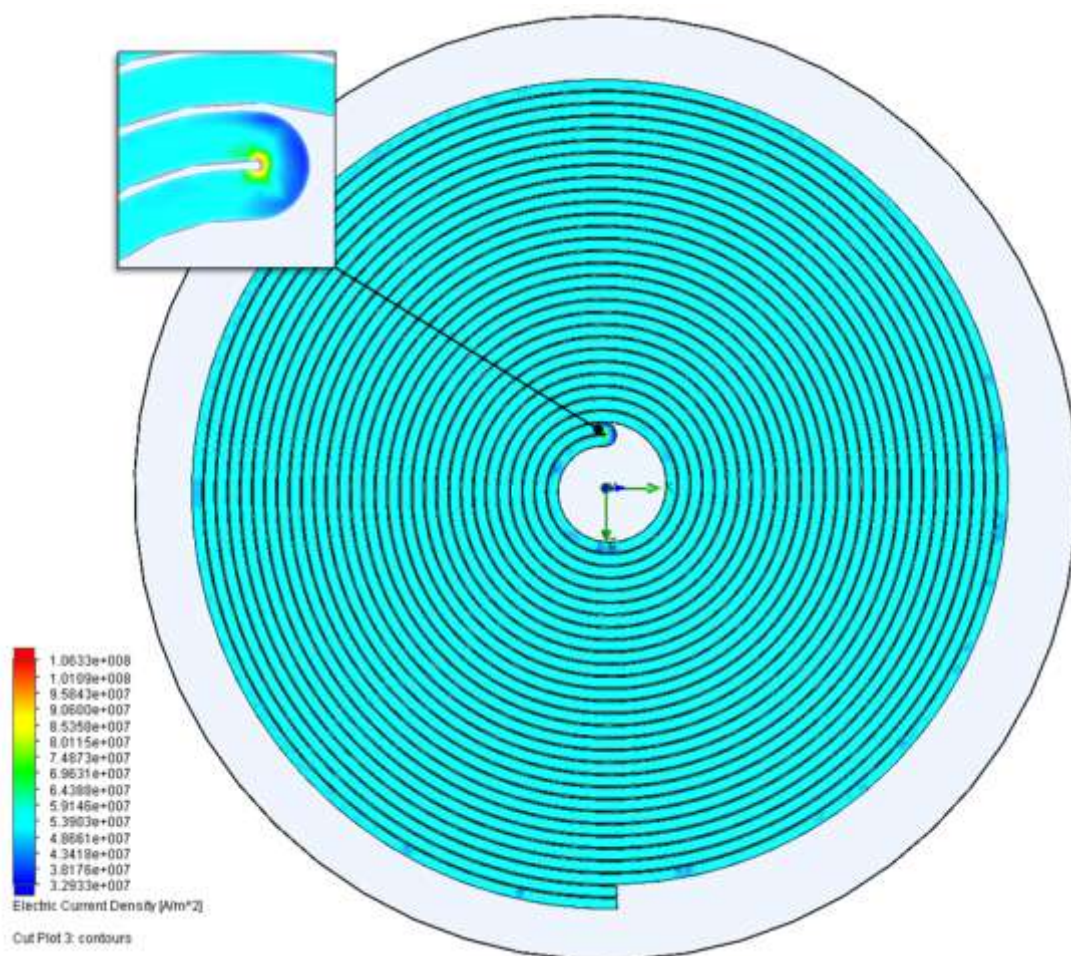
Při porovnání teplotních profilů v ose X obou technických provedení kruhových podložek, které jsou napájeny stejným proudem ( $I = 2\text{ A}$ ), je rozdíl dosažených teplot velmi malý. Nižších teplot dosahuje dvojitě vedená spirála (rozdíl v průměru všech naměřených hodnot obou desek činí  $2,47^\circ\text{C}$ ). Rozdíl se zvyšuje zejména v pravé polovině desky, kde dochází k chlazení vlivem nepřítomnosti plošného spoje. Obě desky mají v pravé polovině tendenci k menším teplotám, protože vedení spirálou nedosahuje plné kruhové oblasti na okraji.



Obr. 5.20: Trojrozměrný teplotní profil podložky DPS vyhřívané dvojitě vinutou spirálou.

Chybějící vedení má tudíž za následek sníženou teplotu, a to zejména u provedení dvojitě vedené spirály, kde chybí vedení o dvojnásobné ploše. Rozložení teplot

a zejména pokles teploty u dvojité vedené spirály je dobře znatelné na trojrozměrném zobrazení simulace (viz. Obr. 5.20)



Obr. 5.21: Rozložení proudové hustoty v dvojité vinuté spirále.

Lokální zvyšování proudové hustoty v obvodu se stejně jako u varianty meandru jednoduché spirály v simulaci nevyskytuje s výjimkou oblasti středu vyhřívané podložky, kde se dvojité vinutá spirála obrací a tvoří tak úzký oblouk. Zvýšení proudové hustoty můžeme pozorovat právě na vnitřní straně tohoto oblouku. Dále můžeme vidět drobné chyby simulace obvodu v podobě tmavších bodových oblastí. Chyby jsou opět způsobeny nedostatečně jemným síťováním modelu a jsou v celkovém pohledu zanedbatelné.

## 5.5 Optimalizace chlazení pro krokové motory tiskárny

Krokové motory jsou charakteristické svým pohybem, který spočívá v identicky dlouhých otočkách za každý elektrický impuls. Při každém kroku motoru se hřídel otočí o přesně známou úhlovou vzdálenost, což z těchto motorů dělá praktická zařízení pro

opakované polohování. Tyto motory jsou díky jejich vlastnostem často používány v robotickém průmyslu.

Použité krokové motory, využívané v této tiskárně, nesou označení NEMA 17 (*National Electrical Manufacturers Association*). Číslo, umístěné v jejich názvu, značí rozměry motoru z jeho čelní strany, kde jsou zpravidla umístěny i závity na uchycení motoru. Rozměry jsou uváděny v palcích, tedy motor NEMA 17 má strany dlouhé 1,7 x 1,7 palce (43,18 x 43,18 mm).

Jedná se o bipolární motory, které jsou schopny produkovat vysoké rozlišení pohybu a jsou tedy vhodné pro aplikace v zařízeních, které vyžadují vysokou přesnost. Jejich spínání je řízeno ovladačem mikrokontroléru. Jejich celá otočka hřídele o 360° je v základu rozdělena na 200 jednotlivých kroků po 1,8°. Zjemnění těchto dvou set celých kroků lze dosáhnout mikrokrokováním, kdy jsou celé kroky rozděleny na více (1/2, 1/4, 1/8) subkroků vysláním sinusové/cosinusové amplitudy na cívky uvnitř bipolárního motoru. Touto metodou lze výrazně zpřesnit a zjemnit chod motorů, pokud není motor mechanicky přetížen. Při velkém mechanickém zatížení nemá mikrokrokování na více než 1/2 kroku užitek.

Tabulka 5.3: Vlastnosti krokového motoru NEMA 17

Jmenovitý proud	1A
Indukčnost	14mH
Odpor	5,8 $\Omega$
Statický krouťací moment	0,5Nm
Zbytkový moment	0,022Nm
Setrvačnost rotoru	54gcm <sup>2</sup>
Rozdělení kroku	32 mezipozic (6400 kroků/otáčku)

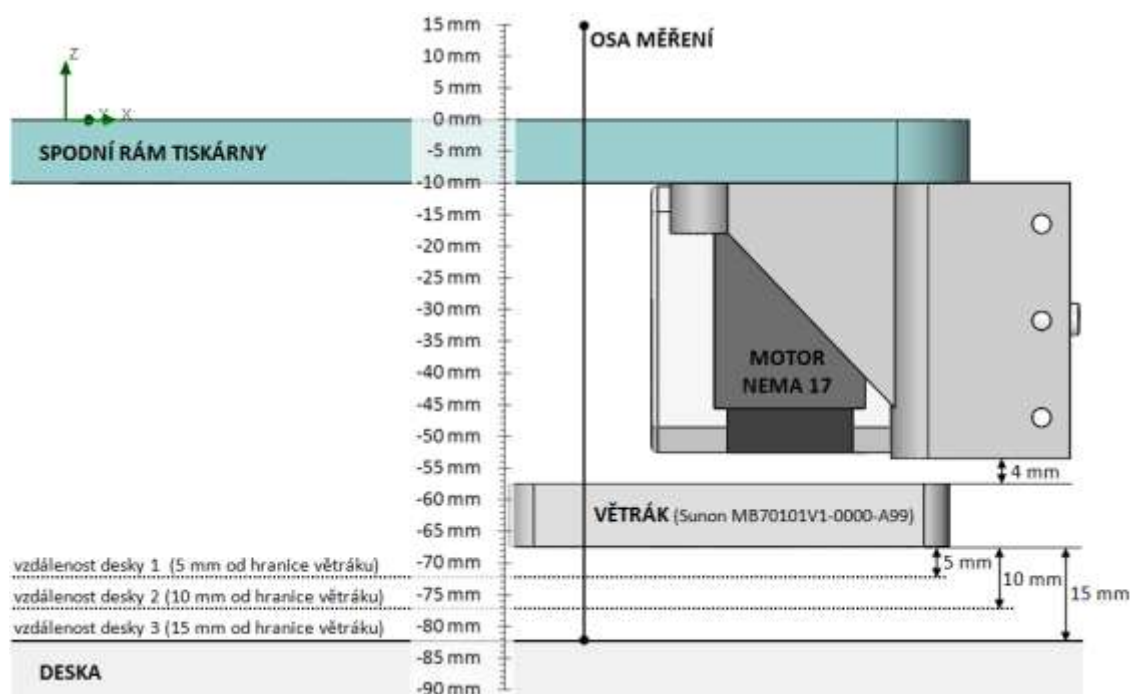
V této tiskárně jsou využívány tři motory NEMA 17 pro pohon ozubených řemenic, které jsou umístěny uvnitř nosných pilířů a zprostředkovávají pohyb ramen středové platformy s uchycenou tiskací tryskou. Kromě těchto tří motorů je v této tiskárně použit stejný typ krokového motoru, opatřeného navíc převodovou soustavou, v extruderu plastového filamentu.

U motorů dochází při své standardní činnosti k jejich zahřívání. Dle technických katalogových listů se může teplota při plném zatížení obou cívek bipolárního motoru vyšplhat až na 80°C. Tato teplota může způsobovat problémy zejména při umístění na plastových konstrukčních dílech. V těchto případech je důležité udržet provozní teplotu motorů pod hranici skelného přechodu materiálu, ze kterého je konstrukce vyrobena. Při použití materiálu PLA je přehřívání motorů velkým problémem a je nutné udržet motory přiměřeně zatížené. Vzestup provozní teploty je úměrný výkonu, který je přímo úměrný čtverci proudu. Točivý moment je přímo úměrný výkonu, tudíž při udržení krokového motoru na 70% jeho výkonu dostáváme při zachování 70% točivého



momentu ztrátový výkon, a tedy i tepelný nárůst, v hodnotě 49% ( $0,7^2=0,49$ ). Zhruba poloviční velikost nárůstu provozní teploty činí teoreticky 40°C.

Abychom zjistili vliv této teploty na podstavu tiskárny a samotný přestup tepla z těla motoru do jeho okolí, případně skrze spodní plexisklový rám tiskárny, je nutné provést simulaci chlazení motoru NEMA 17 větrákem. Vhodnou oblastí pro uchycení větráku se jeví tištěný konstrukční díl, který tvoří spodní spojovací prvek piliře s rámem a zároveň slouží pro samotné upevnění krokového motorku. Větrák typu Sunon MB70101V1-0000-A99 je umístěn ve vzdálenosti přibližně 5 mm od spodní části motoru. Simulace je založena na zjištění dostatečného nasávání vzduchu rotorem, tedy zjištění vhodné vzdálenosti spodní hranice větráku od pracovního povrchu, aby bylo dosaženo dostatečného výkonu chlazení. Závislost na vzdálenosti od desky je postupně simulována ve třech krocích (5mm, 10mm a 15mm), kdy nejmenší rozměr je definován samotnou výškou matky montážního šroubu spolu s podložkou.

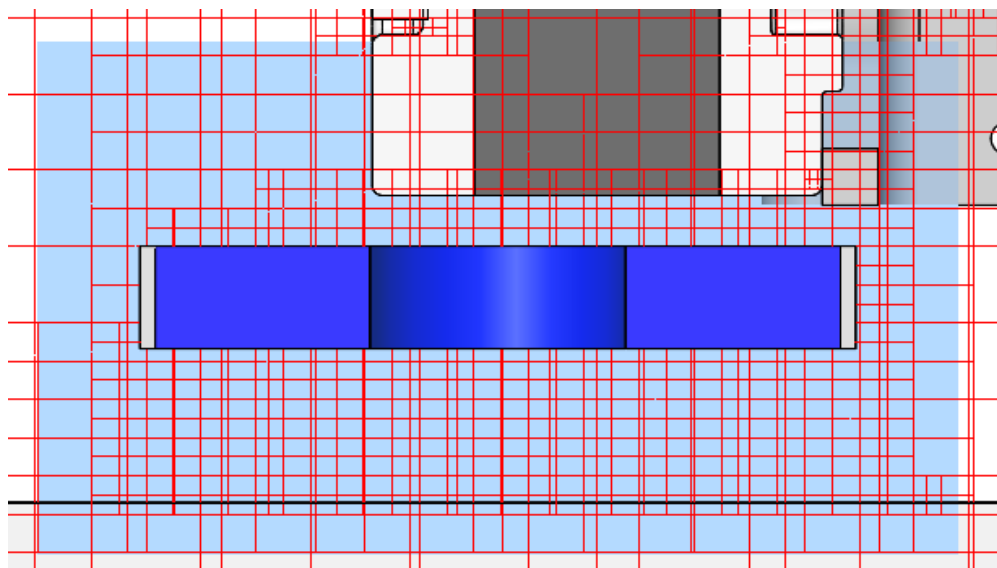


Obr. 5.22: Schéma simulace vzdálenosti větráku od pracovní desky.

Tepelný výkon krokového motoru je v simulaci nastaven na 10W, aby těleso modelu, představující šasi motoru, spolehlivě prohřál přes 40°C. V simulaci je definován axiální větrák Sunon MB70101V1-0000-A99 dle jeho reálných technických parametrů uváděných v příručce zařízení. Rychlost rotoru větráku je nastavena na 314,16 rad/s a hmotnostní průtok rotorem je definován z tabulky (příloha Obr. 7.19)

Pro zlepšení výsledků simulace proudění větrákem je do oblasti mezi pracovní desku a spodní polovinu krokového motoru vsazen kvádr lokálního zjemnění s faktorem sítě 8. Zjemněním síťování celého modelu by se výrazně prodloužil výpočetní čas a výrazného zpřesnění výsledků mimo oblast větráku není potřeba. Lokální zjemnění je

nutné zejména v oblasti nasávání větráku, aby se dosáhlo přesného zobrazení vektorů proudění vzduchu na vstupu ventilátoru. Simulace zobrazuje přesnější výsledky na vstupu a výstupu větrání a chyby proudění v této oblasti jsou tak eliminovány.



Obr. 5.23: Lokální zjemnění síťování v oblasti ventilátoru.

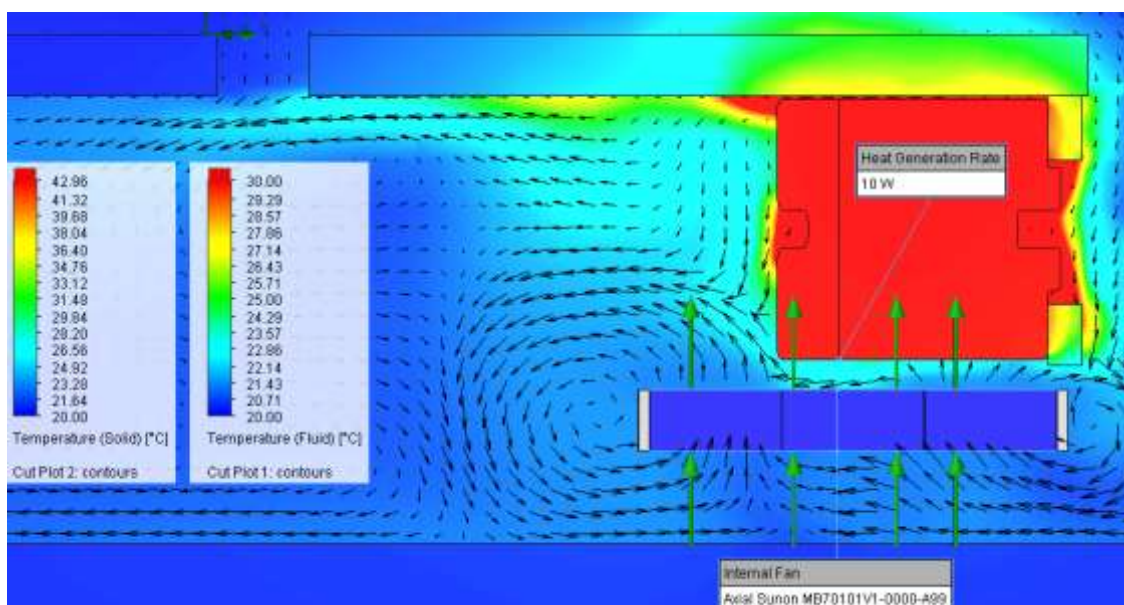
Ze zkoumaných veličin jsou významné výsledky především objemového průtoku větrákem (*Volume Flow Rate*), který je měřen na vstupu rotoru větráku. Dále je dobré se zaměřit na vektory a velikost rychlosti proudění vzduchu (*Velocity*), intenzitu turbulencí (*Turbulence Intensity*) a v neposlední řadě teplotu vzduchu a pevných částí (*Temperature Fluid*, *Temperature Solid*). Co se týče výsledků teploty, je důležité sledovat přestup tepla zejména do ABS konstrukčního dílu uchycení větráku a spodního rámu tiskárny.

Tabulka 5.4: Hodnoty simulace v oblasti nasávání vzduchu rotorem ventilátoru.

Vzdálenost hranice větráku od desky stolu	5 mm	10 mm	15 mm
Tlak vzduchu <i>Pressure</i> [hPa]	1013,0266	1013,0207	1013,0372
Objemový průtok <i>Volume Flow Rate</i> [m <sup>3</sup> /s]	0,0051	0,0095	0,0110
Hustota (vzduchu) <i>Density (Fluid)</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	1,1914	1,1972	1,1993
Rychlost proudění <i>Velocity</i> [m/s]	3,4954	3,7667	3,9679
Výpočetní plocha větráku [m <sup>2</sup> ]	0,0035	0,0035	0,0035

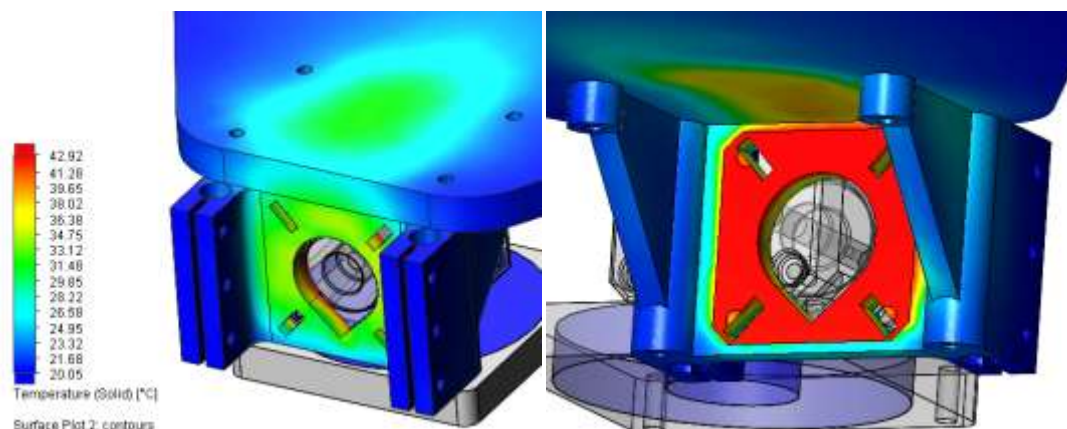
Z výsledků tabulky je dobře znatelné, že při zvyšující se vzdálenosti od pracovní desky, a tedy zvětšování oblasti pro nasávání vzduchu, se zvyšuje zejména objemový

průtok ventilátorem. S větším objemem vzduchu proudícího z rotoru větráku roste zároveň hustota vzduchu, a tím se zvedá i rychlost proudění. Větší skok je znatelný u přechodu mezi vzdálenostmi 5 mm a 10 mm. Vzdálenost 5 mm je co se týče kvality chlazení špatná díky nedostatečné oblasti nasávání skrze relativně úzkou (5 mm) mezeru mezi deskou stolu a spodní hranicí větráku. Rozdíl mezi vzdálenostmi 10 mm a 15 mm se již zmenšuje. S konstantně rostoucí vzdáleností se bude rozdíl v hodnotách čím dál více zmenšovat, až se zcela ustálí.



Obr. 5.24: Simulace přestupu tepla motoru v závislosti na chlazení prouděním vzduchu.

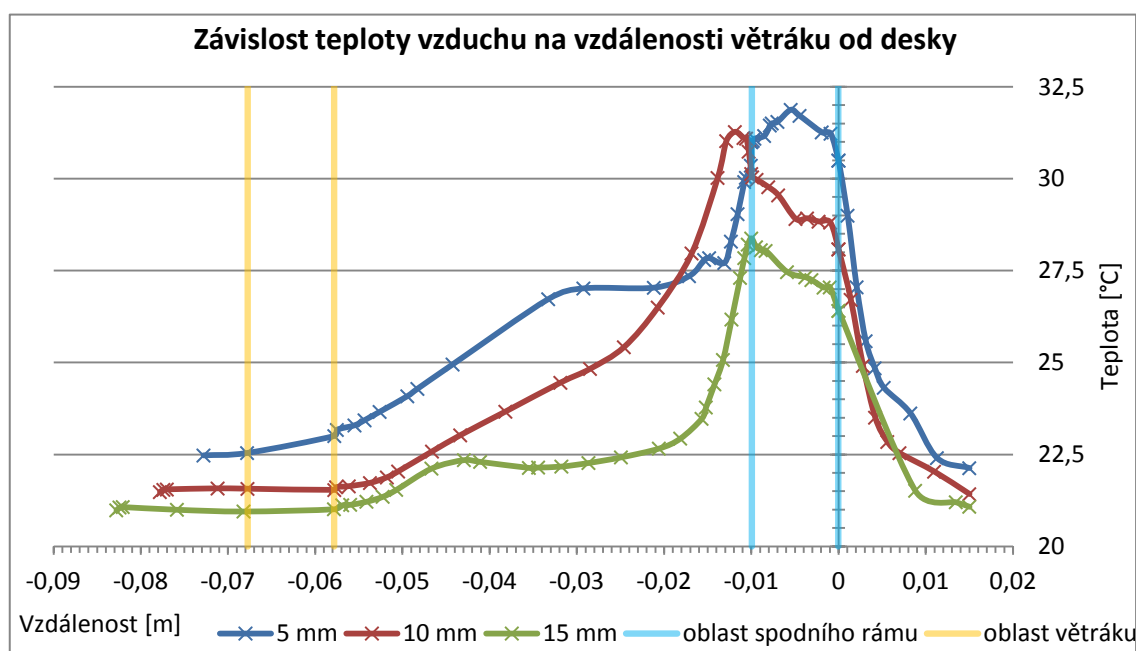
Na obrázku (Obr. 5.24) je znázorněno proudění vzduchu při výšce ventilátoru 15 mm od povrchu. Směr ventilace je znázorněn zelenými šipkami. Střed rotoru (tzv. hub) není průchozí a rotace lopatek je po směru hodinových ručiček. Vektorovými šipkami je vyznačen směr cirkulace vzduchu skrz větrák. Barevnými konturami je znázorněn odvod tepla od motoru. Přestup tepla do spodního rámu tiskárny je skrz úzký prostor nad motorem s velmi omezeným prouděním vzduchu.



Obr. 5.25: Přestup tepla z motoru do okolních konstrukčních součástí.

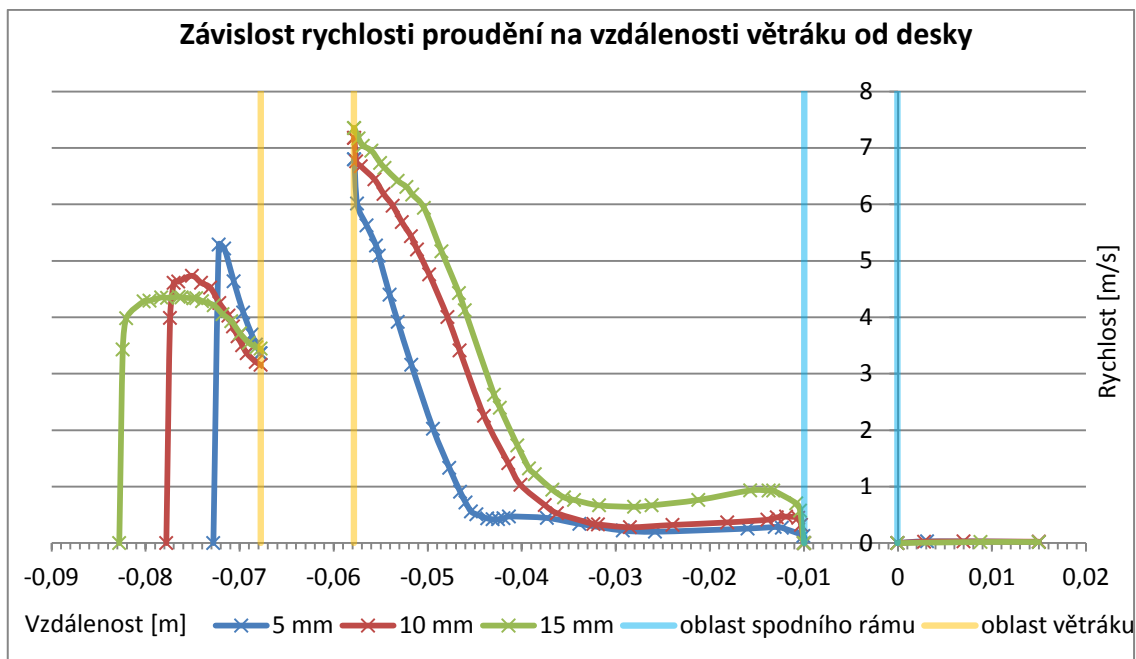
Největší odvod tepla do okolní konstrukce nastává v místě upevnění krokového motorku natěsno (Obr. 5.25), kde dochází k přímému přestupu bez přístupu vzduchu. Spojovací díl pilíře je v místě spojení s motorem prohřátý na přibližně 35°C. Úchyty pro vodící tyče a připevnění spodního rámu jsou v celku chladné. Prostoupení tepla spodním rámem se odehrává v bezprostřední blízkosti motorku a vrchní plocha dosahuje teplot maximálně 30°C, tudíž nebude negativně ovlivňovat temperovanou podložku.

Bezprostřední oblastí krokového motoru je proložena osa ve směru Z a je vedena středem rotorové oblasti ventilátoru. Na této ose jsou v závislosti na vzdálenosti od svrchní plochy spodního rámu tiskárny vyneseny hodnoty měřených veličin (teplota, rychlost, hustota vzduchu, ...). Hodnoty jsou zaneseny do příslušných grafů.



Obr. 5.26: Graf závislosti teploty vzduchu na vzdálenosti větráku od desky.

Z grafu závislosti teploty na vzdálenosti větráku od desky je dobře patrné, že při zvětšení oblasti nasávání se rapidně zlepšuje odvětrávání tepla z oblasti krokového motorku. Při vzdálenosti 5 mm od pracovní desky se teplota v blízkém okolí motoru udržuje stále na hodnotě 26°C. Při navýšení zvětšení odstupu větráku od desky se teplota pohybuje již okolo 22 °C. Poklesu teploty si můžeme všimnout i v oblasti spodního rámu tiskárny, kde teplota klesla o 4,5°C.

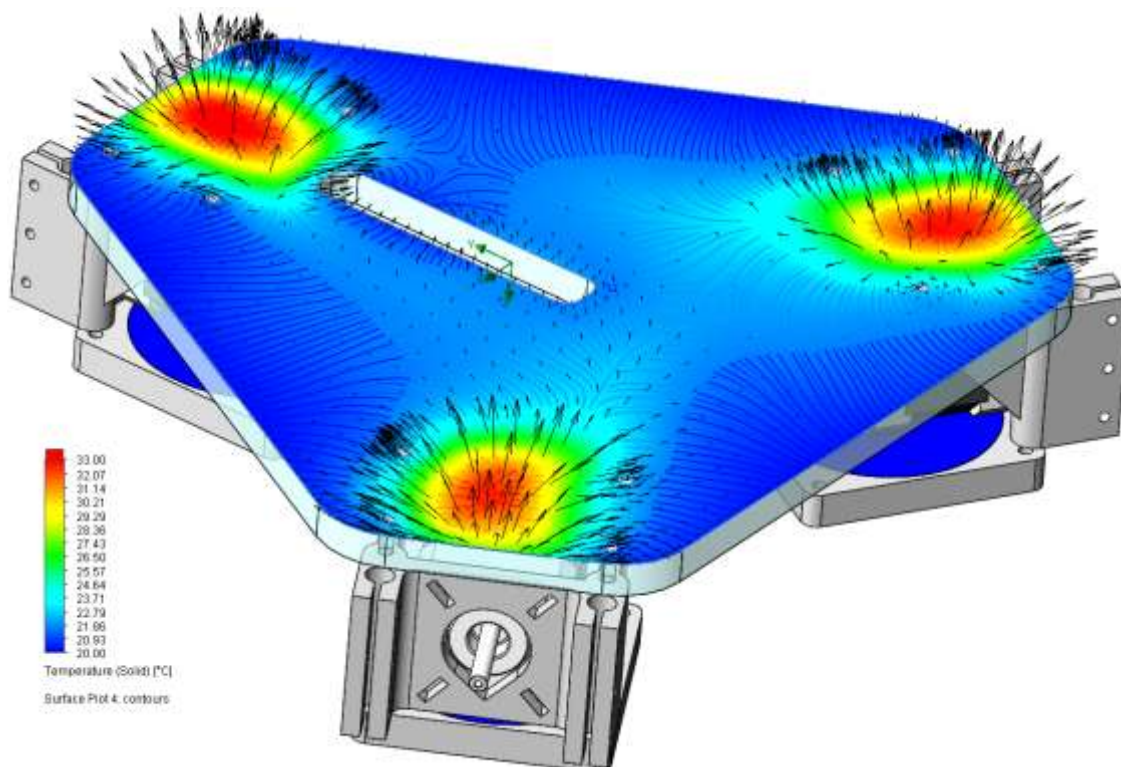


Obr. 5.27: Graf závislosti rychlosti proudění vzduchu na vzdálenosti větráku od desky.

Rychlost proudění vzduchu velice ovlivňuje výsledný vliv chlazení. Čím větší rychlost proudění vzduchu okolo zahřátých součástí, tím je větší jejich ochlazování. Z grafu je patrné, že nad hranicí větráku dochází při zvýšení odstupu desky v oblasti nasávání rotoru k zvýšení rychlosti proudění. Rychlost proudění se vzdáleností od hranice vyústění rotoru klesá. Při malé vzdálenosti se rychlost proudění z ventilátoru snižuje, nicméně díky menšímu prostoru pro nasávání se rychlost proudění pod větrákem zvětšuje.

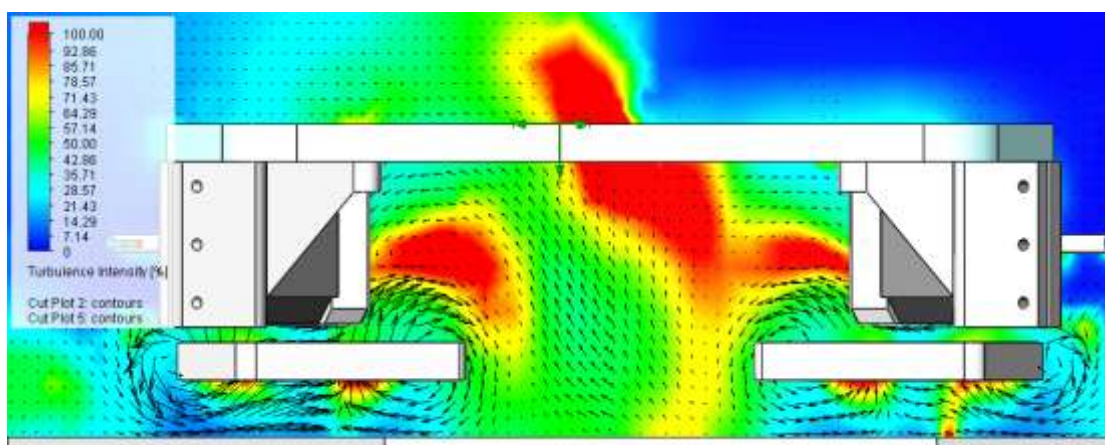
Primární simulace vlivu vzdálenosti vstupní strany větráku od pracovní desky řešily situaci s pouze jedním umístěným motorem a jedním větrákem. Jedná se tedy pouze o jeden objemový zdroj tepla, který je ochlazován jedním ventilátorem. Pro reálnější zjištění tepelných podmínek uvnitř modelu jsou na základě nejlepších výsledků ve vzdálenosti 15 mm doplněny zbylé motory a jejich ventilátory do každého ze tří cípů podstavy. Vlastnosti všech tří tepelných zdrojů jsou identické a jejich teplota zůstává stejná, jako v předchozí simulaci s jedním uvažovaným motorem. Parametry ventilátorů zůstaly také nezměněny.





Obr. 5.28: Rozložení teploty a její přestup do okolí na povrchu spodního rámu.

Z obrázku (Obr. 5.28) je patrné, že i po zapojení všech tří krokových motorů do simulace nenastává žádná krizová situace. Přestup tepla se koná na stejném principu jako při zjednodušené simulaci jednoho motoru. Chlazení jednotlivých motorů svým ventilátorem je dostatečné, aby nedocházelo k markantnímu prostoupení teploty do oblasti tištěného modelu. Spodní rám tiskárny je lokálně zahřátý v místech bezprostřední blízkosti motorů, a to na maximální hodnotu 33°C. Středová oblast rámu si udržuje vyrovnanou teplotu okolo 22°C.



Obr. 5.29: Intenzita turbulencí při zapojení všech tří ventilátorů do simulace.

Jelikož směry proudění vzduchu a také jejich rychlosti se pod rámem tiskárny

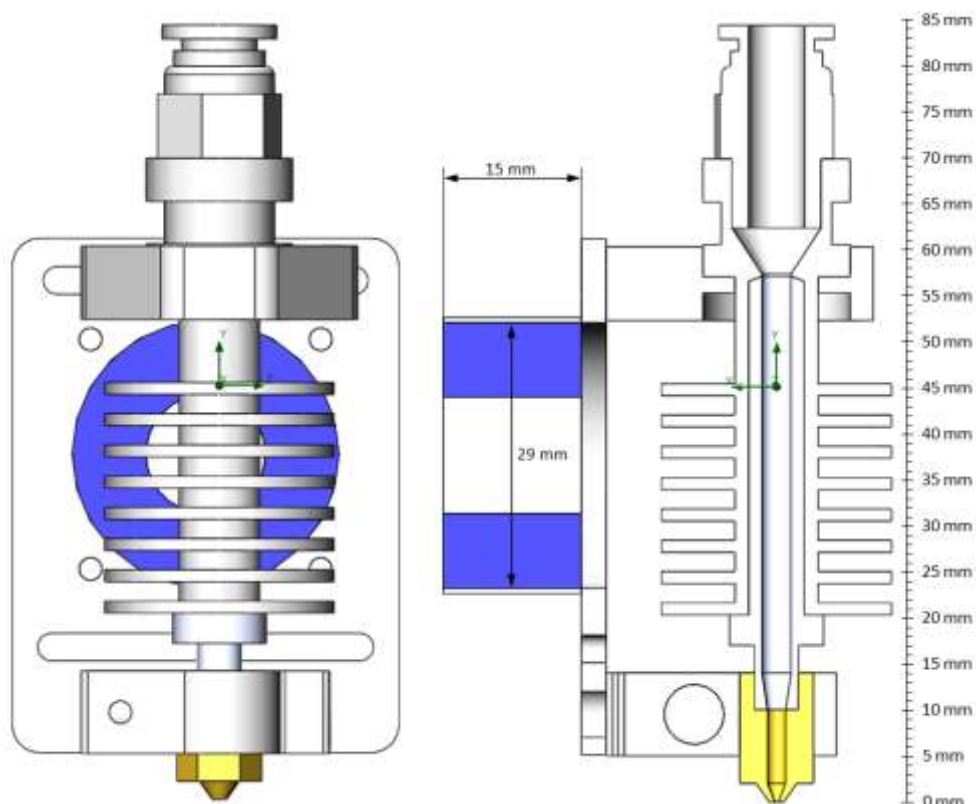
prolínají a vzájemně ovlivňují, dochází na určitých místech k výskytu turbulencí. V příloze simulací (Obr. 7.13) jsou na obrázku znázorněny veškeré směry proudění pomocí vektorových šipek. Z nich je patrné, že mezi všemi třemi ventilátory dochází jednak k cirkulaci vzduchu proti směru hodinových ručiček v centru plochy a jednak k vytlačování vzduchu po pravé straně motoru mimo oblast tiskárny. To je způsobeno identickým otáčením všech rotorů proti směru hodinových ručiček z pohledu shora. V oblastech na spojnicích mezi jednotlivými ventilátory dochází také k vířivým turbulencím.

## 5.6 Simulace prohřívání trysky s chlazením

Tavení vytlačovaného materiálu se odehrává na konci trysky v jejím hrotu (*Hot End*), který je prohříván vestavěným topným tělískem. Vytápění je realizováno pomocí rezistoru, umístěného v bezprostřední blízkosti mosazného hrotu. Aby bylo možné sledovat dosaženou teplotu na hrotu, je v adekvátní vzdálenosti od rezistoru umístěn měřicí termistor. O nastavení konstantní teploty hrotu, vhodné k roztavení vytlačovaného filamentu, se v závislosti na obdržení hodnotách z termistoru stará elektronika tiskárny.

Středová část trysky je opatřena chlazením pomocí žebroví, jehož vnitřkem prochází izolační trubička z nerezové oceli (*Heat Break*), která pomáhá oddělit horkou a chladnou část trysky, aby nedocházelo k tavení materiálu již při jeho vstupu do trysky. Aby bylo dosaženo dostatečného ochlazení střední a horní části, je z boku trysky připevněn malý ventilátor, který prouděním vzduchu skrze žebrovní odvádí přestupující teplo z chladiče do okolí.

Horní část sestavy trysky tvoří vystupující kroužek pro uchycení k pohyblivé plošině tiskárny pomocí vložky z ABS materiálu. Vstupní část je opatřena mechanismem pro přichycení bowdenu, jímž je tavený materiál do trysky přiváděn.



Obr. 5.30: Rozměrové schéma trysky s chladícím ventilátorem

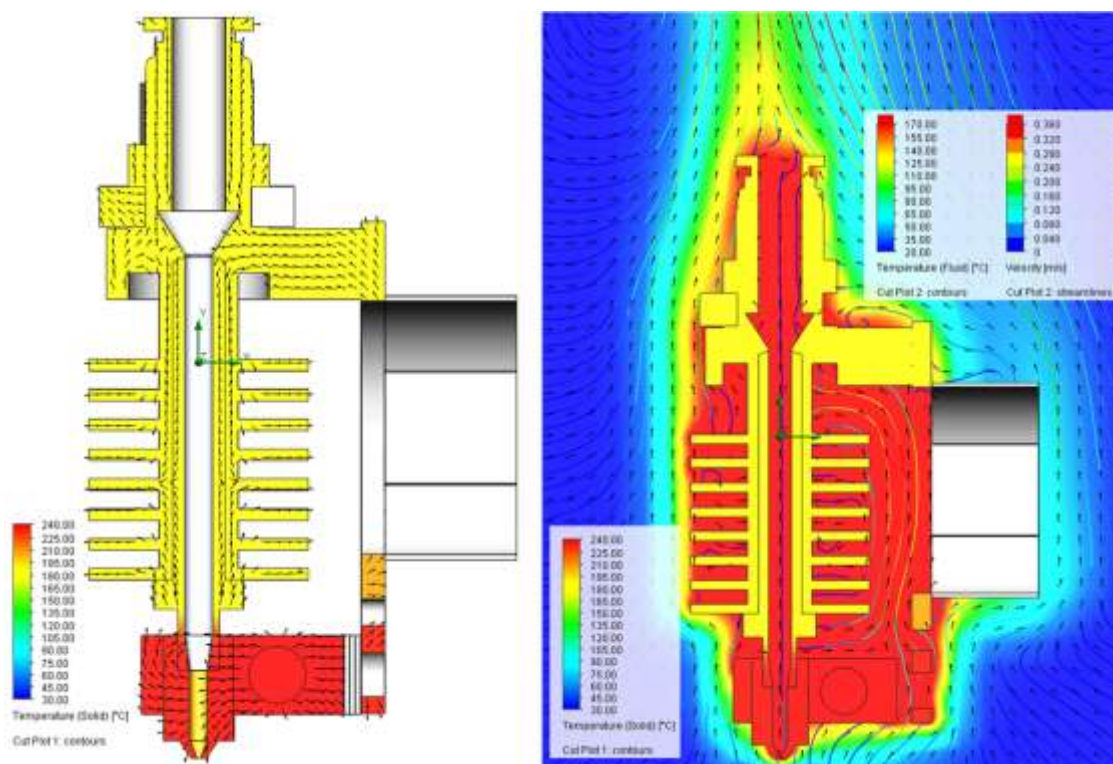
V simulaci prohřívání těla trysky a přestupu tepla do jejího okolí je důležité provést, aby bylo zjištěno správné prohřívání vnitřní cesty pro vytlačovaný filament. Tryska měří od tavicího hrotu po konec mechanismu pro uchycení bowdenu 84,3 mm. Chladicí část je tvořena soustavou 8 žebroví kruhového půdorysu s průměrem 25 mm a s tloušťkou jednoho žebra 1,3 mm. Jednotlivá žebra chladiče mají mezi sebou rozestup 2,1 mm. Celkové chlazení je doplněno ventilátorem o rozměrech 30x30x15, který je přichycen bočně k trysce na nosném hliníkovém rámu. Vzduch je ventilátorem hnán skrz hliníkový žebrový chladič, kde přestupující teplo z těla chladiče do vzduchu odvádí mimo oblast trysky. Šachta rotoru chladiče není zcela zarovnána s oblastí chladiče kvůli nutnosti obrátit předvrtaný nosný rám ventilátoru v důsledku nedostatečného prostoru pro montáž ke středové pohyblivé platformě tiskárny.

Tabulka 5.5: Tabulka vlastností použitých materiálů v simulaci trysky

Součást modelu	Zvolený modelový materiál	Měrné teplo [J/kg·K]	Tepelná vodivost [W/m·K]
Základ trysky	Hliník (Al)	994 (500K)	235 (500K)
"Heat Break"	Nerezová ocel	535 (500K)	18,2 (500K)
Topné těleso	Oxid hlinitý 96%	880	24,7
Hrot trysky	Mosaz	358 (300K)	110 (300K)

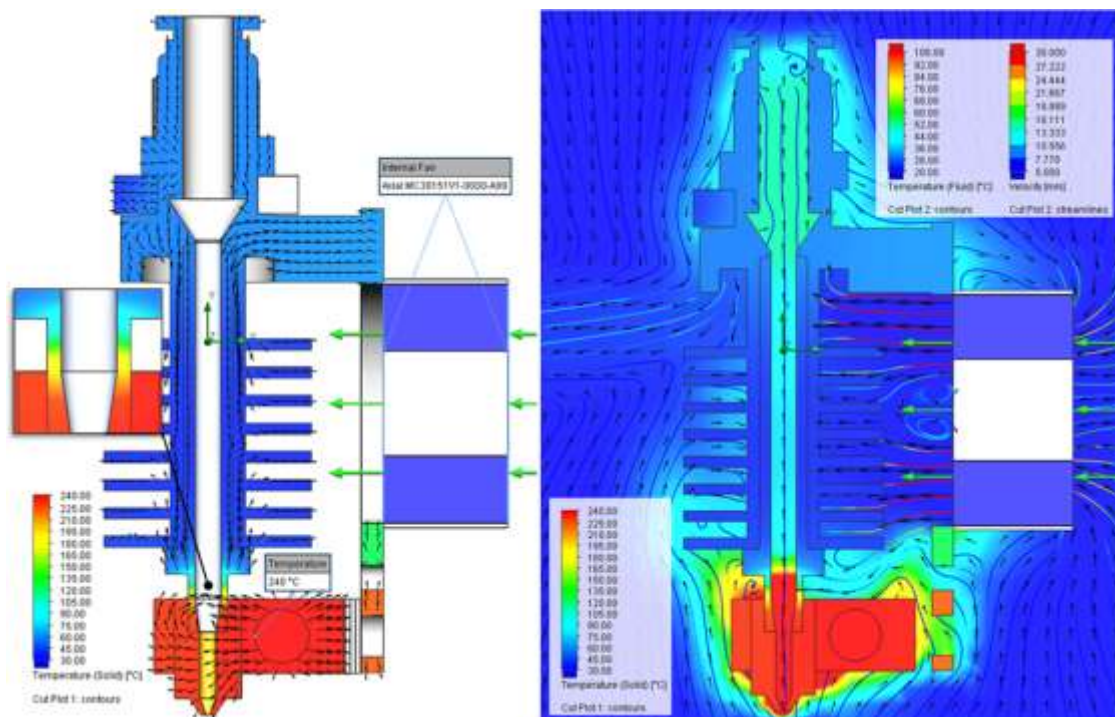


Jedná se o externí simulaci s uvážením gravitace v ose Y, abychom dosáhli reálného stoupání ohřátého vzduchu. Dutiny bez proudění a vnitřní prostory jsou z výpočtů vyloučeny. Okolí trysky je vyplněno vzduchem a v simulaci je uvažováno laminární i turbulentní proudění. Ventilátor je definován jako interní axiální Sunon MC30151V1-0000-A99 s definovanou rychlostí 890 rad/s. Tepelný zdroj ve tvaru válce je vnořen do spodního úchyty trysky a je definován jako objemový zdroj tepla o teplotě 240°C. V celé výpočetní oblasti trysky je nastaveno nejvyšší možné zjemnění s faktorem 8, aby bylo dosaženo co nejpresnějších informací šíření a přestupu tepla. Použité materiály jednotlivých součástí v modelu jsou uvedeny v tabulce 5.5, materiál pro model ventilátoru je nastaven jako izolátor s nulovou tepelnou vodivostí.



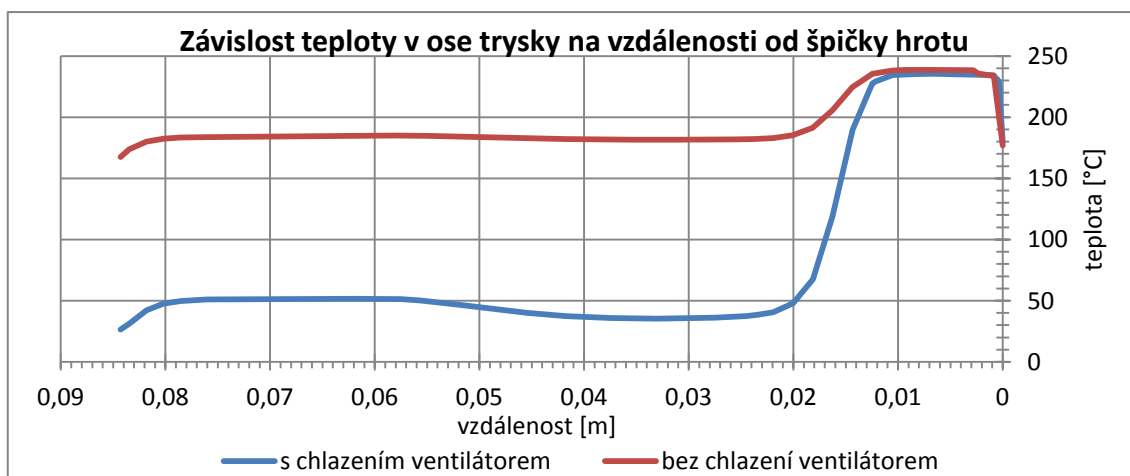
Obr. 5.31: Prohřívání trysky (vlevo) a přestup tepla do okolí (vpravo) bez chlazení.

Při simulaci prohřívání trysky s potlačeným chlazením ventilátorem je z obrázku vidět, že pasivní chlazení žebrovým chladičem sice odvádí část tepla do prostoru, nicméně teplota v oblasti nad tavící tryskou není ochlazována pod teplotu 180°C. Při této teplotě by se tavený materiál (zejména PLA) začínal tavit již na vstupu trysky a docházelo by k ucpávání vnitřní izolační trubičky. Bez ventilátoru není teplý vzduch vyfukován z oblasti chladiče a udržuje se v bezprostředním okolí sestavy trysky. Teplota vzduchu v okolí činí až 170°C. Při této teplotě by mohl ohřátý vzduch stoupající vzhůru okolo trysky ovlivňovat ABS materiál tištěných dílů tiskárny (úchyt trysky, středová platforma, klouby středové platformy).



Obr. 5.32: Prohřívání trysky (vlevo) a přestup tepla do okolí (vpravo) s chlazením.

Po implementaci ventilace větrákem v simulaci prohřívání trysky je z obou obrázků zcela jasné, že ochlazování proudícím vzduchem z rotoru větráku pomohlo s odváděním tepla z chladiče, a tedy snížením teploty vrchní části sestavy trysky o 90%. I přes silný odvod tepla z těla trysky zůstává mosazný hrot rovnoměrně prohřátý na teplotu okolo 235°C. Z obrázku (Obr. 5.32) je vidět, že vnitřní trubička z nerezové oceli sloužící jako "Heat Break" plní svoji funkci tepelné izolace velmi dobře. Teplota v přechodové oblasti trubičky, jež činí přibližně délku 8 mm, klesla o 190°C. K přestupu tepla dochází i skrze nosný rám ventilátoru, který dosahuje teploty ve své horní části 65°C. Teplota vstupní části, která je k nosnému rámu připojena, a tudíž je ohřívána i touto cestou, činí v průměru 50°C.



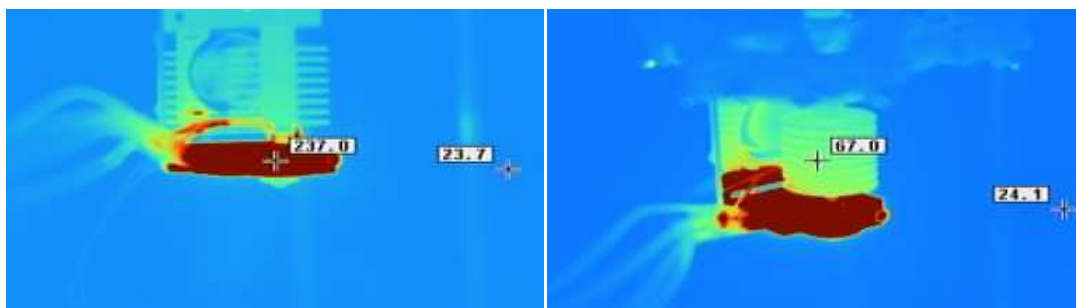
Obr. 5.33: Graf znázorňující vliv ventilátoru na chlazení tělesa trysky.

Z průběhu grafu závislosti teploty v ose trysky na vzdálenosti od špičky hrotu jsou názorně vyneseny průběhy změny teploty v celé délce trysky. V oblasti hrotu je teplota identická u obou variant chlazení s hodnotou 235°C. Markantní rozdíl nastává v přechodu do oblasti chladiče, kdy varianta se zapnutým ventilátorem je ochlazená o více než 135°C oproti variantě s vypnutým chlazením.

Schéma proudění vzduchu z ventilátoru skrze žebrovitý chladič trysky je možné vidět v příloze (Obr. 7.20). Proudění je zde pro názornost zobrazeno pomocí trajektorií rychlosti vzduchu (*Velocity pipes*). Maximální rychlosti proudění dosahuje vzduch při výstupu z rotoru ventilátoru s hodnotou 46,5 m/s.

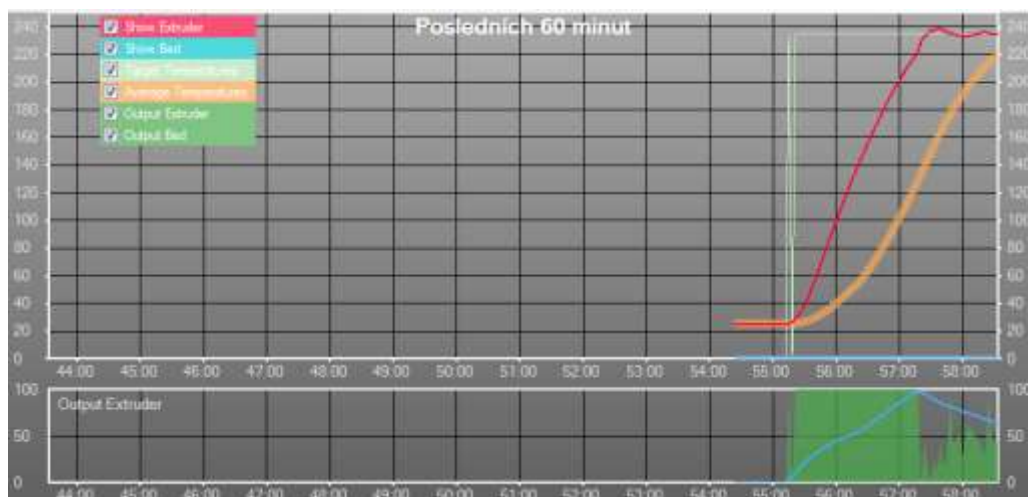
### 5.6.1 Prohřívání reálné trysky s chlazením

Reálnou trysku jsme zkušebně nechali krátký čas prohřívát s nastavenou hodnotou na 240°C. Této cílové hodnoty tryska dosáhla přibližně během dvou minut od začátku prohřívání. Na prvním snímku je vidět, že vytápěná část snadno dosáhne teploty až 237°C a díky přechodové části mezi hrotem trysky a chladičem trysky přestupuje teplo tělem trysky málo. Chlazení napomáhá přimontovaný ventilátor, který je na prvním snímku zapnutý. Na druhém snímku je znázorněn přestup tepla po delší době prohřívání pouze s omezeným ventilováním. I bez plného výkonu ventilace teplota nepřekračuje 70°C. Na pravém obrázku si lze všimnout značného přestupu tepla do hliníkové destičky, na které je přichycen ventilátor.



Obr. 5.34: Snímky tepla termokamerou na hrotu trysky (vlevo) a přestup do chladiče (vpravo).

Na snímku grafického průběhu křivky prohřívání trysky z ovládacího programu Repetier (Obr. 5.35) je vidět v horním rámečku start prohřívání naznačen tenkým zeleným skokem na hodnotu 240, což je cílová hodnota prohřátí. červená linie symbolizuje reálnou teplotu zaznamenanou termistorem umístěným v těle trysky. Při dosažení teploty 240°C začíná teplota mírně kolísat okolo cílové hodnoty. O toto kolísavé udržování teploty se stará právě PWM modulace, jejíž průběh spínání je vidět v druhém rámečku, kde zelené spektrum značí procentuální spínání a úroveň tekoucího proudu rezistorem.

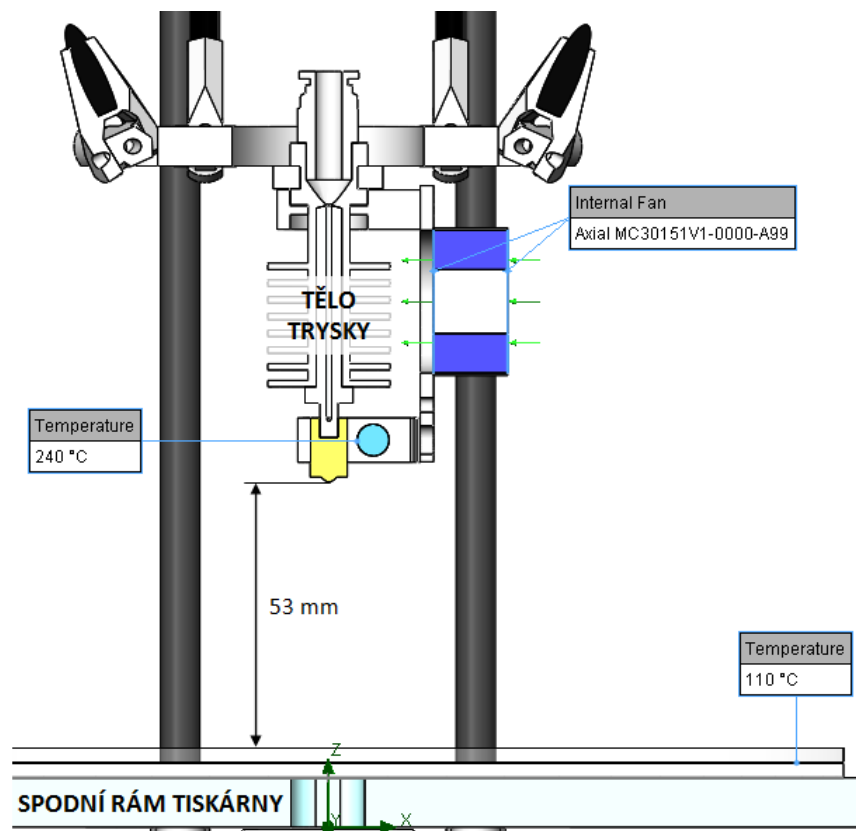


Obr. 5.35: Průběh počátku vyhřívání hrotu trysky z obslužného programu Repetier.

## 5.7 Vyhřívání vnitřních prostor tiskárny

V konečném sestavení všech primárních komponentů tiskárny se nachází několik různých zdrojů tepla a zároveň tiskárna obsahuje i několik chladících prvků. Významnými tepelnými zdroji, nacházejícími se v bezprostřední blízkosti tištěné oblasti, jsou tryska a temperovaná podložka. Chladícím prvkem v této oblasti je ventilátor, který ochlazuje studenou oblast trysky.

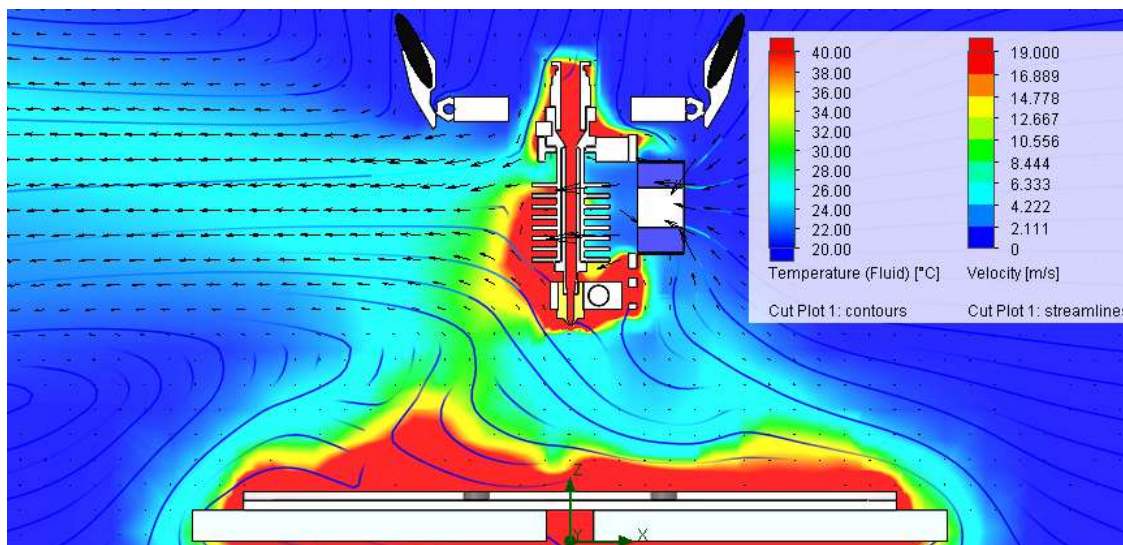
Pro zkvalitnění tisku je dobré znát vnitřní proudění teplého vzduchu, zejména pak v oblasti tištěného modelu. Působení velké teploty nebo naopak velkého ochlazování na tištěný výrobek nepříspěvá jeho kvalitě, ba naopak může způsobovat problémy v tuhnutí či smršťování materiálu.



Obr. 5.36: Schéma zdroje tepla a chlazení pro simulaci v modelu tiskárny.

Simulace je prováděna s rozmístěním tepelných zdrojů v modelu, jak je zobrazeno ve schématu (Obr. 5.36). Hrot trysky je od svrchní plochy temperované podložky vzdálen 53 mm a tryska je vzhledem k tiskárně vycentrována. Teplota trysky je nastavena objemovým zdrojem (*Volume source*) na 240°C a teplota meandru vyhřívané podložky na 110°C. Samotný meandr podložky je pro zjednodušení simulace nahrazen měděným kruhovým plátem s tloušťkou a průměrem, který odpovídá rozměrům modelu měděné spirály v simulaci kruhové temperované podložky s dvojité vinutým spirálovým meandrem. V oblasti trysky a jejího chladicího ventilátoru je vloženo lokální zjemnění, aby bylo dosaženo přesnějších výsledků proudění vzduchu žebrovitým chladičem trysky.



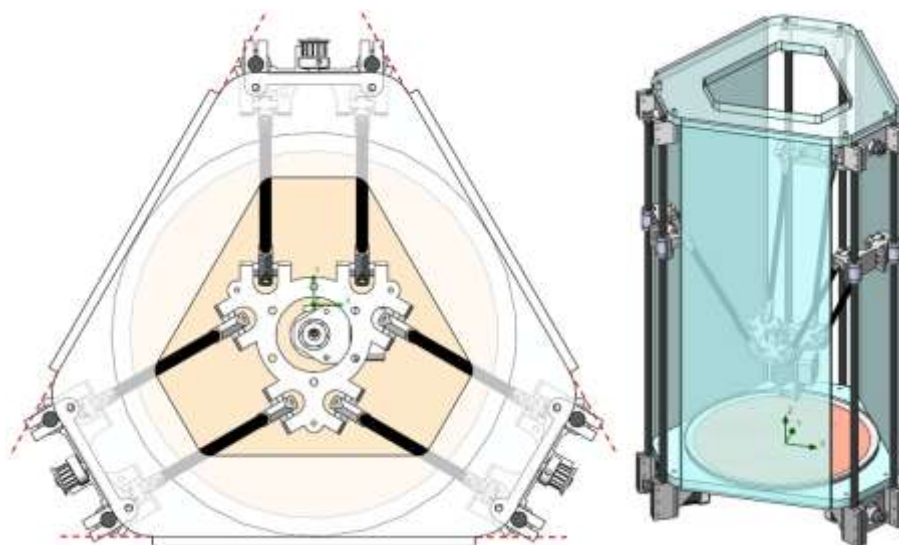


Obr. 5.37: Odvádění přestupujícího tepla z chladiče ventilátorem mimo oblast otevřené tiskárny.

Při pohledu na vektory proudění vzduchu je velmi dobře vidět, že ventilátor trysky odvádí nejen většinu přestupujícího tepla z chladiče trysky, ale odfukuje část teplého vzduchu stoupajícího od vyhřáté podložky. Teplota vzduchu v levé části tedy dosahuje mírně vyšších hodnot než v pravé části tisknutelné plochy.

Aby se teplota uvnitř tiskárny dala udržet konstantní, nabízí se realizace uzavřené verze tiskárny, kdy je na všechny tři strany trojúhelníkového tvaru rámu přimontována plexisklová deska. Soustava tří desek na každé straně rámu tvoří dohromady částečně uzavřený obal oblasti tiskárny. Celkové uzavření objemu je přerušeno v oblastech pilířů, kde montáž desek neumožňují spojovací díly vodících tyčí (Obr. 5.38). V simulaci s touto variantou, jak je možné vidět v příloze (Obr. 7.16), teplý vzduch hnáný ventilátorem trysky se odráží od plexiskla. Větší část tepla odchází mimo tiskárnu již zmiňovanou mezerou mezi jednotlivými plexiskly v oblasti pilíře. Část tepla se obrací a recirkuluje po stěnách desky uvnitř objemu tiskárny. Stoupající teplo nahore uniká skrze neuzavřený vrchní rám tiskárny.

Abychom úniku tepla vlivem stoupání skrze horní část tiskárny zamezili, je možné simulovat chování teplého vzduchu při plném horním rámu. Simulace s touto plně uzavřenou variantou naznačuje plynulé proudění tepla po stěnách tiskárny v její horní části a také je možné vidět mírný nárůst teploty v její spodní části. Rozdíly ovšem nejsou tak markantní právě díky mezerám mezi bočními obalovými deskami.



Obr. 5.38: Model uzavřené tiskárny s přimontovanými bočními deskami

Simulace zcela uzavřené verze tiskárny je dosaženo vytvořením monolitického obalu, který je shora nasazen na sestavu tiskárny uzavřené verze. Tímto jsou odstraněny škvíry v oblasti pilířů a vnitřní objem je tak zcela neprodyšně oddělen od okolního prostoru. Z výsledků při porovnání vidíme, že zamezení teplému vzduchu v unikání škvírami uzavřené verze do okolí, značně zvyšuje vnitřní teplotu tiskárny. V naprosto identickém objemu válce měření uvnitř sestavy je dosaženo teploty až 30,2°C, tedy o necelých 7°C vyšší než u nejvyšší teploty předchozích simulací.

Tabulka 5.6: Porovnání jednotlivých naměřených veličin pro různé varianty uzavření tiskárny.

Varianta uzavření modelu tiskárny	Otevřena	Uzavřena s otvorem	Uzavřena	Zcela uzavřena
Tlak vzduchu <i>Pressure</i> [hPa]	1013,2213	1013,2192	1013,2190	1013,1339
Rychlost proudění <i>Velocity</i> [m/s]	0,3072	0,6900	0,7133	1,8796
Teplota vzduchu <i>Temperature (Fluid)</i> [°C]	21,7386	23,2851	23,3419	30,2292
Měřená oblast [m <sup>3</sup> ]	0,0147	0,0147	0,0147	0,0147

Při porovnávání hodnot tabulky všech variant uzavření je na první pohled vidět rostoucí tendence dosahované teploty ve vnitřní oblasti tiskárny, která je způsobena čím dál více omezenou recirkulací produkovaného teplého vzduchu se vzduchem okolí.

## 5.8 Simulace sestavy pro 3D tisk s PLA materiálem

Jelikož je použitá tryska J-head vhodná i pro tisk s materiálem PLA, je možno stavěnou tiskárnu delta pi optimalizovat tak, aby tisk s PLA umožňovala. Aby bylo dosaženo vhodných podmínek okolního prostředí, je nutné snížit mírně teplotu trysky na 215 - 220°C, dále pak výrazně snížit či zcela vypnout vyhřívání temperované podložky a nejdůležitějším krokem je opatřit trysku chladícím ventilátorem, který urychlí proces vychládání a tuhnutí vytlačovaného materiálu. Jak již bylo řečeno v podkapitole 2.2, PLA materiál oproti ABS pomaleji tuhne, a tak je nutné vytlačovanou taveninu PLA chladit, abychom předešli deformacím modelu. Chladicí ventilátor je montován pod úhlem na stranu trysky, aby proudění vzduchu směřovalo přes špičku hrotu na tištěný model.

Montáž PLA ventilátoru je prováděna skrze středovou platformu uchycenou na pohyblivých delta ramenech. Zkosený díl pro uchycení je namontován na distanční díly, abychom dosáhli adekvátního umístění ventilátoru. Osa proudění vzduchu větrákem po uchycení do zkoseného montážního dílu svírá s osou tisku úhel 35°. Prodloužená vzdálenost distančních hranolů je zapříčiněna uchycením trysky zespod středové plošiny a tím posunutím hrotu trysky směrem dolů, jež je nutné hranoly kompenzovat. V simulaci je díl s uchyceným ventilátorem vzdálen od spodní plochy středové platformy 21,2 mm. Nejnižší hrana nakloněného ventilátoru je od hrotu trysky vzdálena 10,75 mm, takže je eliminováno nechtěné zavadění o tisknutý model.

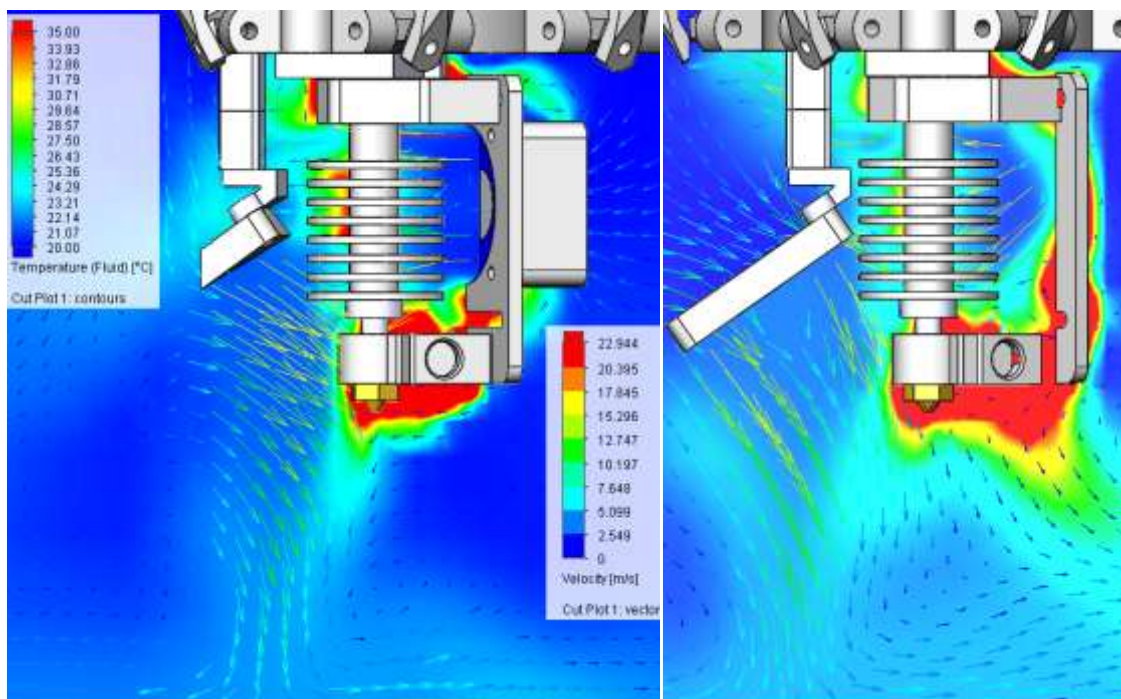
V simulaci je ponechán typ ventilátoru chladiče trysky z předešlých simulací Sunon MC30151V1-0000-A99. Pro chlazení vytlačovaného materiálu je zvolen axiální větrák Sunon MC40060V2-0000-A99. Zdroj tepla tvoří pouze topné tělísko žhavení trysky, které má nastaveno teplotu na 220°C. Temperovaná podložka v této simulaci směru chlazení materiálu PLA není uvažována.

Při prvních zkušebních simulacích byly osy proudění obou ventilátorů v jedné rovině. Toto sestavení způsobovalo ve výsledku úplné odstranění proudění z větráku pro chlazení PLA, které bylo vytlačováno ve směru ventilátoru žebrovitého chladiče trysky, jenž dosahuje vyšší rychlosti proudění. Abychom docílili dostatečných výsledků směru proudění obou ventilátorů zářez, je rovina rotoru větráku chladiče trysky od roviny PLA chlazení vychýlena o 36,4°. Odklonění obou směrů proudění z jedné roviny již umožňuje dosáhnout názorných výsledků směrů proudění z obou rotorů.

Z grafických výstupů simulace je možné vidět zobrazení proudícího vzduchu pomocí vektorů, jehož směr je velmi ovlivněn kombinací obou ventilátorů. PLA chlazení vyfukuje vzduch směrem téměř kolmo na tiskací plochu. Tento směr proudění je ovlivňován prouděním chlazení trysky, které se částečně svádí zkosenou plochou větráku tisku. Část vzduchu proudícího skrze žebrovitý chladič je zpětně nasáváno rotorem ventilátoru tisku a cirkuluje opět v oblasti pod tryskou, kde proudící vzduch odvádí část tepla produkovaného vyhřívání trysky. Vzduch v oblasti tiskárny nyní

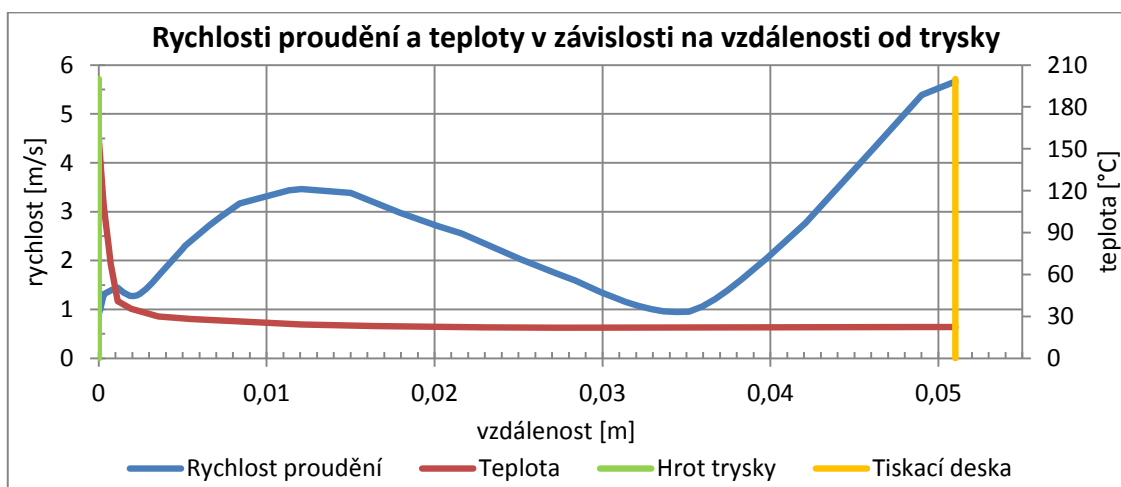


proudí dvěma různými směry, které se navzájem částečně ovlivňují.



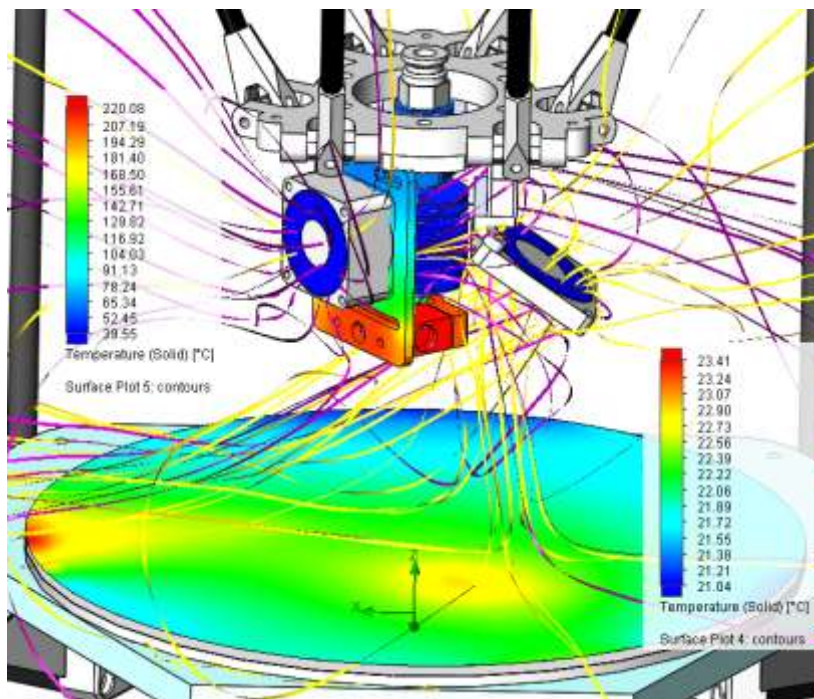
Obr. 5.39: Proudění vzduchu chlazení v sestavě pro 3D tisk s PLA materiálem.

Závislosti teploty a rychlosti proudění vzduchu na vzdálenosti od hrotu trysky je vynesena do grafu. Osa měření je vedena ze středu trysky do středu plochy tiskací plochy, která je vzdálena přibližně 51 mm. Proudění vzduchu v oblasti ve vzdálenosti do 1 cm od hrotu trysky dosahuje rychlosti bezmála 3,5 m/s. Na povrchu desky rychlost vystoupá více než na hodnotu 5,5 m/s. Teplota vzduchu na této ose není nijak proměnlivá a v úseku 6 mm od hrotu trysky klesá ze 160°C na hodnotu 23°C, jež se s velice mírně klesající tendencí drží po celý zbytek měřené osy.



Obr. 5.40: Závislosti rychlosti proudění a teploty na vzdálenosti od trysky pro tisk s PLA.

Vzájemné ovlivňování proudění oběma ventilátory je zobrazeno na obrázku níže (Obr. 5.41), kde fialová barva proudících trajektorií náleží chlazení trysky, žlutá pak trajektoriím vzduchu proudícím rotorem větráku PLA. Na ploše tiskací desky je vidět, že působením proudění dochází k lokálnímu zvyšování teploty v místě intenzivního nárazu vzduchu. Nicméně teplotní rozdíl je minimální a nemá hodnotu větší než půl stupně Celsia. Většího nárůstu teploty si lze povšimnout v levé části na hraně desky, kde proudící vzduch ohřívá skleněný okraj desky na necelých 23,5 °C. Lokální nárůst teploty v této oblasti nezasahuje do běžné oblasti tisku, a tak jej můžeme zanedbat.



Obr. 5.41: Simulace směrů proudění obou ventilátorů s využitím zobrazení trajektorií.

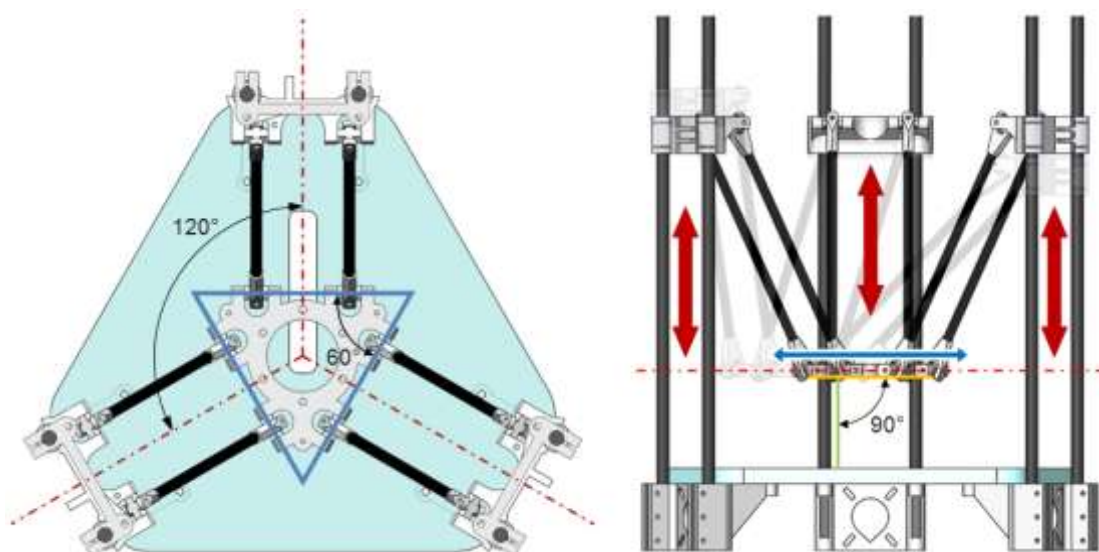
## 6 KONSTRUKCE TISKÁRNY

delta pi 3D tiskárna, která je tématem této diplomové práce, typově vychází z RepRap modelu s názvem Rostock Mini. Jak již bylo řečeno v úvodu, jedná se o tiskárnu fungující na principu delta robota. Veškeré pohyby jsou prováděny skrze tři svisle posuvná nezávislá delta ramena, jež jsou spojeny ke středové plošině s tryskou

### 6.1 Hardware tiskárny

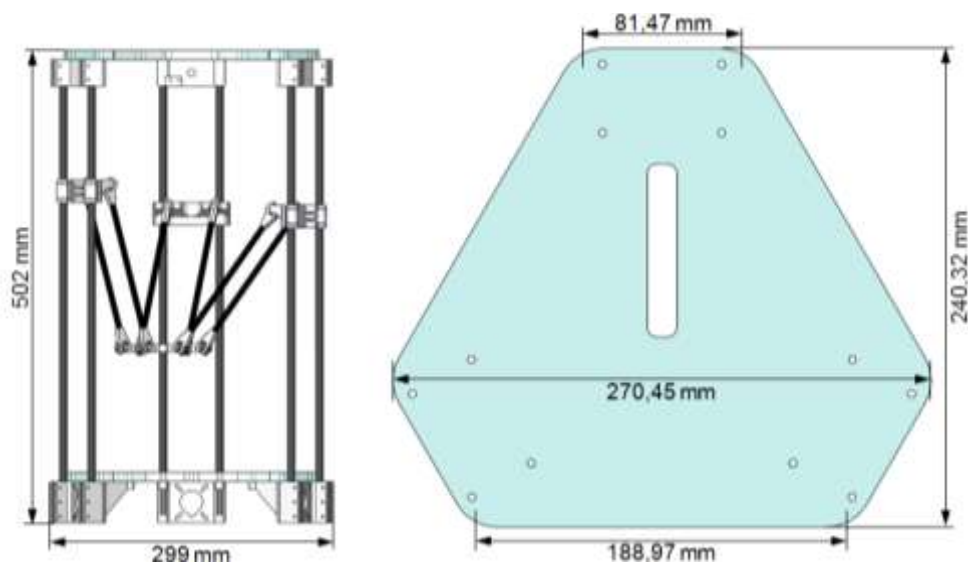
Hlavní prvky konstrukce tiskárny tvoří tři pilíře, které se skládají pokaždé ze dvou ocelových hlazených tyčí s průměrem 8mm a délkou 492mm. Nahoře a dole každé z nich je přišroubován plastový spojovací díl, jenž drží jednotlivé dvojice tyčí pohromadě a zároveň umožňuje montáž spodního a vrchního plexisklového rámu. Tyto pilíře tvoří jednak základní tvar tiskárny a dále pak slouží jako vodící tyče pro posuvný díl uchycení delta ramen s ložisky. Použití ložisek při posuvu znatelně usnadňují pohyb po tyči odstraněním tření, eliminují opotřebení pohyblivých částí, a tím také prodlužují životnost celého zařízení. Druhé konce delta ramen jsou uchyceny v rovnostranně trojúhelníkovém rozmístění ke středovému dílu, na kterém je umístěna žhavicí tiskařská tryska. Středová plošina je tištěna jako ostatní plastové konstrukční díly obvykle z materiálu ABS a v důsledku je velmi lehká, tudíž neomezuje pohyb trysky. Samotná ramena jsou tvořena tyčkami z lehkého tvrzeného plastu a na obou stranách jsou zakončeny sestavou všesměrového kloubu, který umožňuje jejich volný pohyb.

Veškerý pohyb tiskárny zprostředkovávají tři krokové motorky NEMA 17, které jsou přišroubovány ke spodním spojovacím dílům jednotlivých pilířů, ty zároveň nesou i spodní rámovou platformu, na níž je umístěna výhřevná podložka. Rotace motorků je převáděna na lineární pohyb připojenou ozubenou kladkou a smyčkou ozubené řemenice, která je napevno připojena k posuvnému dílu uchycení delta ramen. Horní hranice posunutí po tyči je limitována stop spínačem, jenž je umístěn na horním spojovacím dílu posuvných tyčí.



Obr. 6.1: Úhel svírající jednotlivá ramena (vlevo), schéma pohybu ramen (vpravo).

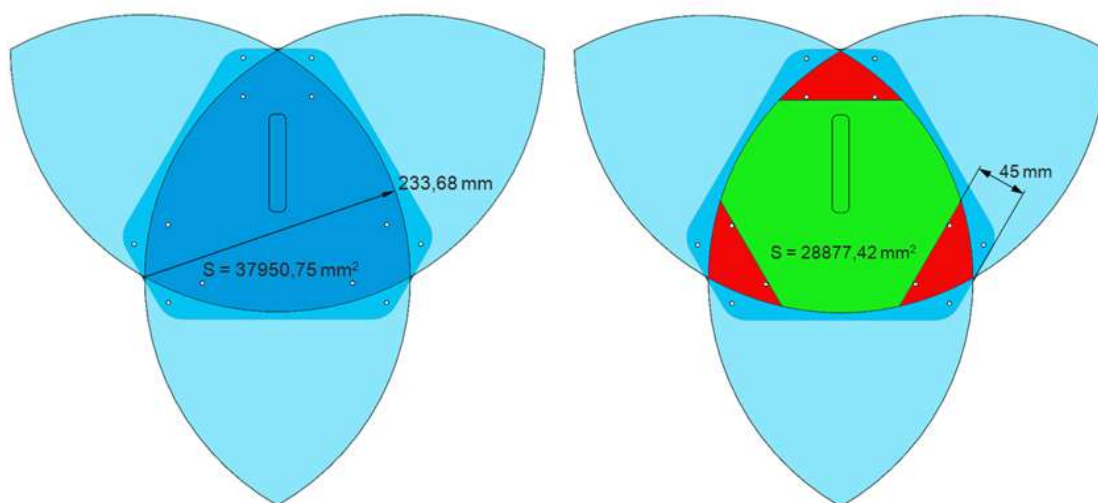
Výška celé tiskárny je 502 mm od patových uchycení vodících tyčí po vrchní rámování. V této výšce není zahrnuta výška větráků přišroubovaných k patovým dílům uchycení krokových motorků ani výška extruderu, případně uchycení špulky struny filamentu, umístěného na vrchním rámování. V nejširší části má tiskárna rozměry přibližně 299 mm. Tato hodnota je měřena v oblasti nejvzdálenější hrany plastových dílů uchycení vodících tyčí.



Obr. 6.2: Rozměry tiskárny (vlevo) a spodního rámu tiskárny (vpravo).

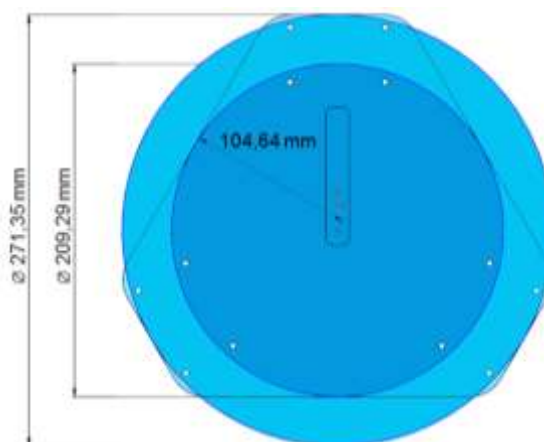
Teoretická maximální tisknutelná výška je okolo 168 mm, měřená od svrchní plochy vyhřívané podložky po hrot trysky vysunuté do maximální možné polohy pojezdových dílů ramen. Maximální tisknutelná plocha je ohraničena maximálním dosahem pohyblivých ramen uchycení trysky. Při naprosto vodorovné poloze jednoho ramene je maximální vzdálenost trysky od vodících tyčí tiskárny 233,68mm. Teoretická

maximální plocha tisku při uvážení této vzdálenosti činí  $37950,75\text{mm}^2$ . Pokrytí takové plochy ale tiskárna reálně nedosahuje. Je nutné brát v úvahu omezení v oblasti pilířů, kde nelze středem trysky dosáhnout kvůli šířce středového dílu tiskárny.



Obr. 6.3: Teoretický (vlevo) a reálný (vpravo) obsah tisknutelné plochy tiskárny.

Od maximální tisknutelné oblasti se odvíjí velikost vyhřívané podložky nutné pro využití plného tisknutelného potenciálu tiskárny. Maximální velikost kruhové vyhřívané podložky, kterou je možné do oblasti spodního rámu vsadit, je přibližně 271 mm. Okraje této podložky by byly, co se týče oblasti reálně tisknutelné plochy, nepotřebné, nicméně žádná vyhřívaná podložka formou DPS nemá zavedený motiv až do okraje kruhové plochy. Sériově vyráběné kruhové vyhřívané podložky pro tiskárnu typu delta pi (např. Rostock Mini) jsou vyráběny v rozměru 215 mm, z čehož průměr oblasti přímo vyhřívané plochy vedeným motivem obvodu činí 200 mm. Minimální oblast tiskárny Delta Pi, při které nepřesahuje okraje spodního rámu pro uchycení podložky, je přibližně 209 mm. Při uzavíratelné verzi tiskárny s využitím hran vrchního a spodního rámu je nutné realizace vyhřívané podložky tomuto rozměru podřídít.



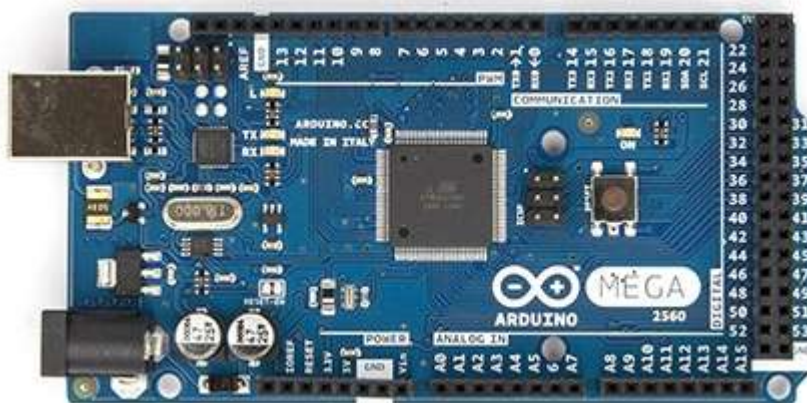
Obr. 6.4: Schéma maximálních velikostí temperované podložky pro delta pi tiskárnu.



## 6.2 Elektronika tiskárny

Veškerý pohyb a s ním spojené získávání teplotních a pohybových informací vychází ze sestavy elektroniky, která se skládá ze čtyř dohromady propojených modulů. Každý z jednotlivých desek zabezpečuje propojení s příslušnými součástmi, které ovládá.

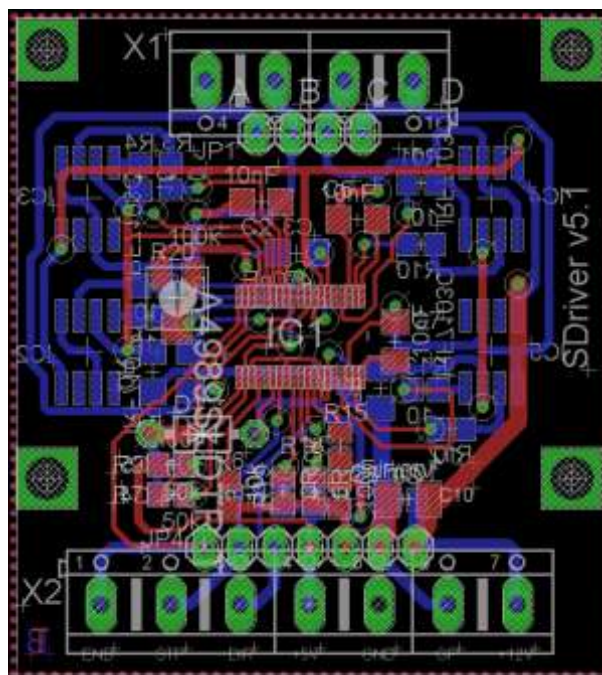
Arduino Mega 2560 je modul, který zprostředkovává veškerou komunikaci se softwarem v počítači pomocí USB konektoru a zároveň řídí svým mikroprocesorem veškerou činnost krokových motorů, vytápění desky a tiskací trysky, spínání všech ventilátorů dle potřeby a obsluhu ostatních periférií, jako například SD kartu či displej.



Obr. 6.5: Arduino Mega 2560. [23]

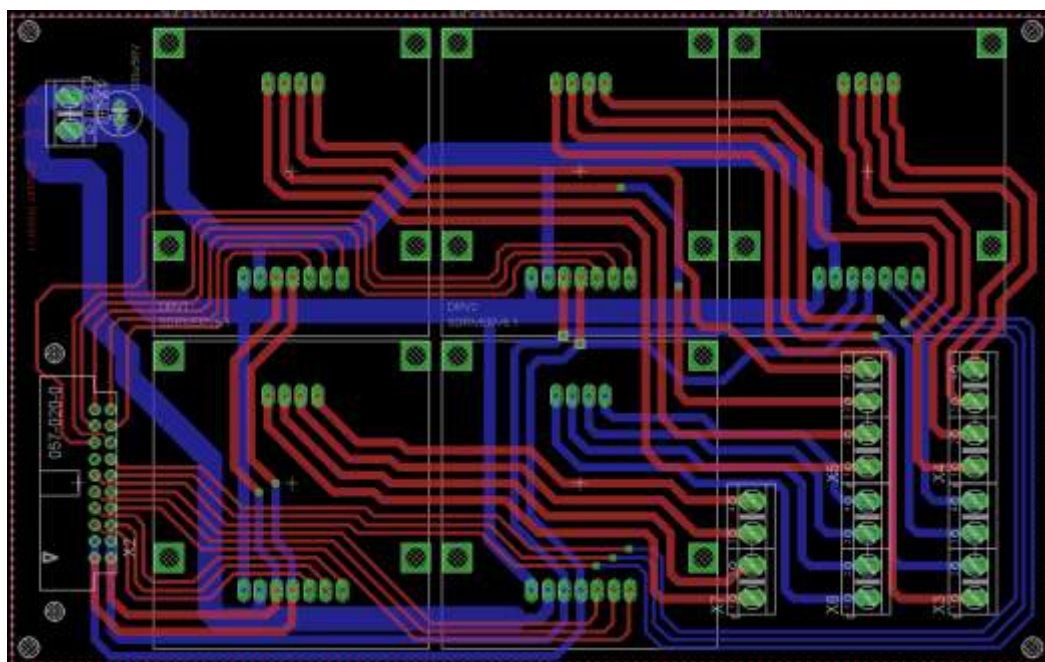
Typ mikroprocesoru na desce je ATmega2560. Modul je vybaven 54 digitálními vstupy a výstupy, ze nichž 16 lze využívat jako kanály pulzně šířkové modulační PWM. Další výbavou je 16 analogových vstupů, 4 sériové porty UART, 16 MHz krystalový oscilátor, konektor pro USB a resetovací tlačítko. Paměť mikroprocesoru je 256 kB, ze kterých 8 kB je využito pro spouštění. Dále je zde k dispozici 8 kB SRAM paměti a 4 kB paměti EEPROM. [23]

Základem pro samotnou obsluhu krokových bipolárních dvoufázových motorů je integrovaný obvod A4989, který ovládá dva MOSFET mosty H s translatorem pro mikrokrokování. Jejich napájení je poskytováno skrze externí N-MOSFET tranzistory ze zdroje s rozsahem 12V až 50V. Integrovaný obvod obsahuje dva sinusové digital/analog převodníky, které generují referenční napětí pro dva zcela oddělené PWM proudové regulátory, které poskytují regulaci proudu pro dva externí výkonové H-MOSFET mosty. Samotné krokování motoru je ovládáno dvěma vodiči a směr vlastním rozhraním, které řídí jednotlivé mikrokroky v různém rozlišení (1/1, 1/2, 1/4, 1/16). PWM Regulátor je schopný pracovat ve třech rozkladových módech, a to v pomalém, kombinovaném a rychlém. Výsledkem je snížení produkovaného hluku krokovými motory, zvýšení přesnosti chodu a snížení výkonových ztrát. Integrovaný obvod je jednoduchý a nepracuje s vysokofrekvenčními ovládacími prvky. Také nepotřebuje složité ovládání, díky čemuž odpadá použití komplexního ovládání mikrokontrolérem.



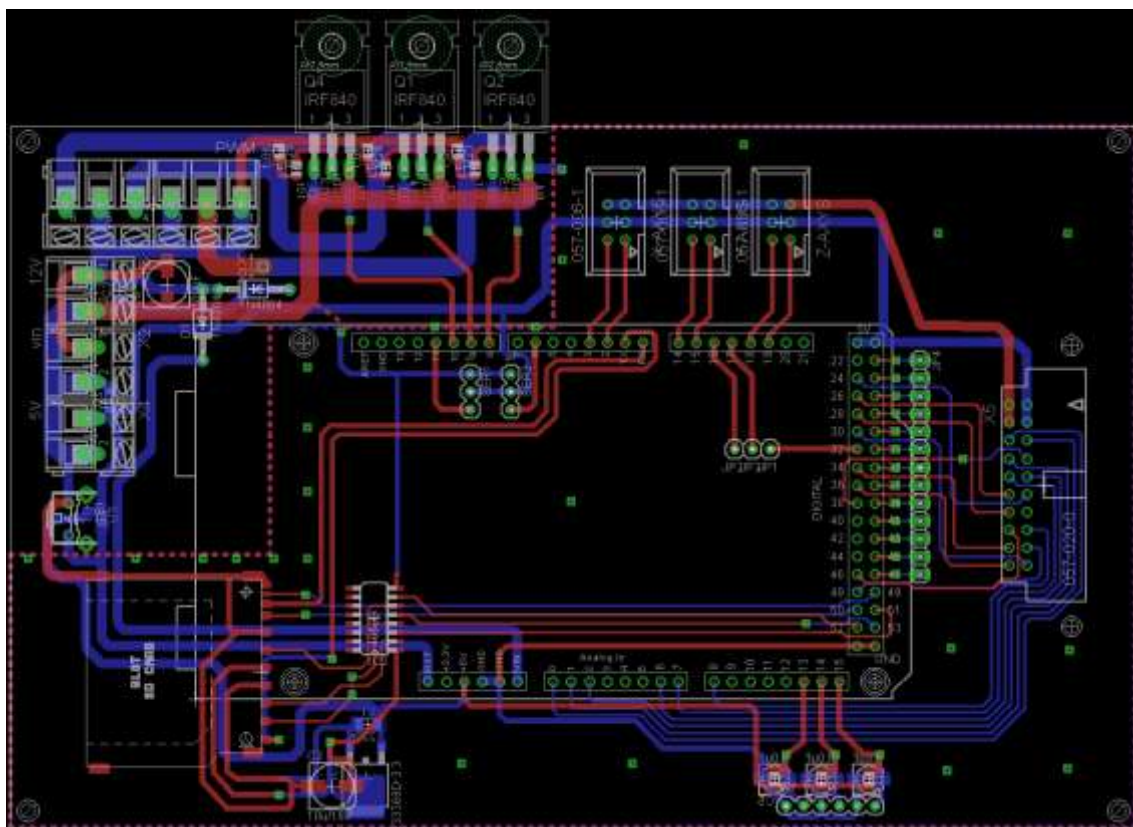
Obr. 6.6: Deska s integrovaným obvodem IO-A4989.

V celkové elektronické sestavě je na druhém místě v hierarchii deska spojující pět shieldů pro jednotlivé krokové motory tiskárny. Každý z pěti štítů zabezpečuje pohon jednoho čtyř drátového krokového motoru. Vše je řízeno z komunikačního modulu Arduino. Rozložení všech pěti shieldů na desce je vidět na obrázku. Tato deska slouží k vzájemnému propojení všech pěti štítů pro krokové motory dohromady. Na levé straně desky je umístěn konektor, jenž slouží k propojení této desky s modulem na nejnižší úrovni v hierarchii soustavy.



Obr. 6.7: Deska s pěticí štítů k obsluze krokových motorů a jejich konektory.

Na nejnižší položce v celkové hierarchii sestavy je modul, který propojuje Arduino právě s deskou, na které je umístěna pětice štítů korkových motorů. Tento modul obsahuje slot k SD kartě a k ní potřebnou elektroniku v podobě integrovaného obvodu 4050D (šestinásobný buffer) a MC33269D (stabilizátor napětí 3V3). Dále je na této desce umístěn obvod pro posílení PWM výstupů (IRF840), připojení k napájecím konektorům, konektory pro endstopy pojezdů řemenic a obvody k připojení až tří termistorů.



Obr. 6.8: Deska s propojením pro Arduino, konektory termistorů, endstopů a napájení.

Schémata zapojení všech jednotlivých desek jsou uvedeny v příloze obrázků C (Obr.7.15 - 7.17).

## 6.3 Tiskací tryska

Tiskací tryska typu J-head v2.0 pro FDM tisk zvolena pro tiskárnu delta pi je složena z hliníkového topného tělesa, mosazného tiskacího hrotu a vnitřní izolační trubičky (*Heat Break*) vyrobené z ušlechtilé oceli, která zajišťuje dobrou tepelnou izolaci filamentu a zabraňuje ucpání trysky. Vnější část trysky je pokryta anodickým oxidem hliníovým, který zvyšuje odolnost a tvrdost trysky a tepelného chladiče a odolnost vůči korozi. Žebrovité chlazení trysky je vybavené přídavným větrákem, který je zaměřen přímo na operační oblast chlazení. Díky větráku je zajištěna kvalitní tepelná izolace přiváděného plastu pro tavení uvnitř trysky.

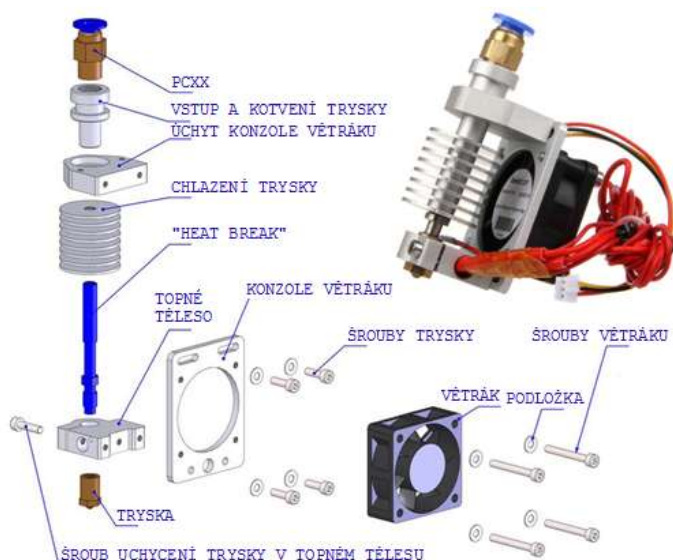


Tabulka 6.1: Vlastnosti tiskací trysky J-head v2.0 použité v tiskárně delta pi.

Průměr trysky	0,5 mm
Pracovní teplota trysky	180 - 260°C
Průměr filamentu	3 mm
Typ filamentu	ABS, PLA
Průtok tryskou	24 cm <sup>3</sup> /h
Vstupní napětí	12V
Napětí větráku	12V
Termistor	100k NTC, ±1% (25°C)

Vytápění trysky na teplotu vhodnou k tavení materiálu pro tisk je prováděno skrze rezistor s řízeným proudem pomocí pulzní šířkové modulace. Ta zajišťuje adekvátní velikost proudu tekoucího obvodem rezistoru. Nejběžnějším typem rezistoru, jenž je umístěn uvnitř hliníkového topného tělesa, bývá drátový rezistor, který je schopen produkovat dostatečně vysokou teplotu pro tavení. Teplo v rezistoru vzniká při průchodu proudu skrze jeho tělo. Čím více proudu skrze rezistor protéká, tím je produkováno větší teplo.

Druhou elektronickou součástí, která slouží pro regulaci tepla produkovaného rezistorem, je termistor. Ten bývá umístěn v blízkosti samotné trysky a zároveň tedy i výhřevného odporu. Termistor sbírá informace o dosažené teplotě a odesílá je mikrokontroléru, který na základě obdržené hodnoty teploty reguluje proud tekoucí rezistorem. V trysce J-head, kterou je tiskárna delta pi vybavena, je použit 100 kΩ (odpor při 25°C) termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*). Negativní teplotní koeficient termistoru znamená, že při rostoucí teplotě okolí se jeho odpor snižuje.



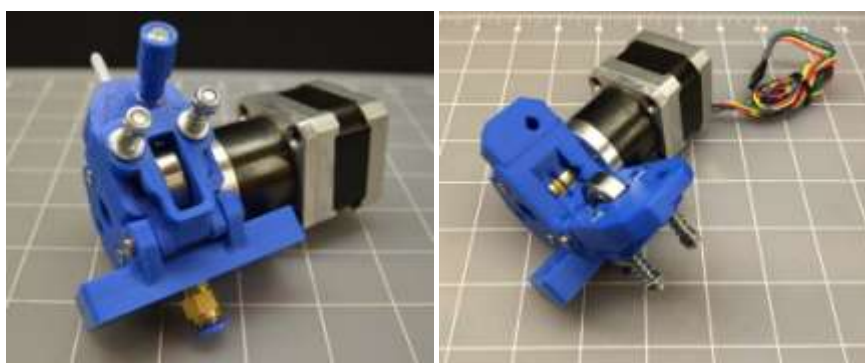
Obr. 6.9: Schéma složení soustavy trysky J-head pro Delta Pi tiskárnu.

## 6.4 Extruder

Vytlačování plastového filamentu bodenem do hrdla trysky zprostředkovává motorový extruder. Pro tiskárnu Delta Pi byl zvolen Frame-Mount Bowden Extruder v3.7, který je vybaven krokovým motorkem NEMA 17. Motorek je převodován v poměru 14:1, aby byl na ozubeném kolečku velký točivý moment a dobrá přilnavost filamentu. Právě tento poměr zajišťuje spolehlivé vytlačování pevně sevřeného vlákna na dlouhou dobu. Při menším poměru může při chodu docházet k přehřívání motoru či přeskokování kroků při tisku. Na hřídel krokového motorku je přišroubována řemenice s velmi jemným frézováním, které zajišťuje pevný stisk v kombinaci s přítlačovým ložiskem, působícím z druhé strany tlačného filamentu. Přítlak je možné regulovat šrouby s pružinou. Přístup k vnitřní části je zabezpečen odklápěcí částí s uchyceným ložiskem, která je aretována šroubem. Extruder je vybaven bowdenovými úchyty na vstupu a výstupu a je navržen tak, aby umožňoval pohyb filamentu oběma směry. Plastové tělo extruderu je tištěno z materiálu ABS s tloušťkou vrstvy 0,25 mm.

Tabulka 6.2: Vlastnosti extruderu použitého v tiskárně delta pi.

Typ filamentu	ABS, PLA
Tloušťka filamentu	3 mm
Motor	NEMA 17
Převodovka	Kysan 17HG-B1/14-750C
Převod motoru	14:1
Řemenice	HBPLY8BR2
Bowden	PTFE 4mm/6mm (In/Out)



Obr. 6.10: Extruder pro vytlačování taveného plastu použitý v tiskárně delta pi.

## 6.5 Výhody tiskárny delta pi

Konstrukce tiskárny formou delta designu poskytuje při 3D tisku několik nesporných výhod díky specifické delta technologii pohybu trysky. Poměr počtu tiskáren na tomto principu ovšem není tak vysoký, jak by se dle všech výhod mohlo zdát.

První významnou výhodou tiskárny typu delta je, že díky lineárnímu posuvu dílů horního ukotvení tří delta ramen dosahuje mnohem vyšší rychlosti pohybu trysky v ose Z. Samotný lineární chod zabezpečují tři krokové motorky NEMA 17, umístěné v podstavě tiskárny. Konvenčnější pojetí posuvu 3D tiskáren v ose Z je založeno na rotaci svislých tyčí se závitem, které zdvihají platformu s uchycenou tryskou. Takto prováděný pohyb má samozřejmě svou charakteristickou limitaci v rychlosti otáčení. Výhoda v rychlosti posuvu ve vertikálním směru u 3D tisku je ovšem sama o sobě kontroverzní, protože pohyb hrotu trysky v ose Z nastává pouze při započetí nanášení další tisknuté vrstvy modelu. Samotný spor tedy spočívá v rychlosti provedení kroku zvednutí hrotu trysky, která se může zdát při samotném tisku nedůležitá. Při využití tiskárny pouze pro domácí potřeby a při vyrábění nesériových dílů je tento faktor opravdu nepodstatný. Ovšem v porovnání s velkokapacitní sériovou výrobou je již tento činitel znatelný, zejména při návratovém pohybu trysky do výchozí pozice umístění trysky při restartu programu, která je obvykle v horní části tiskárny, a při pohybu z výchozí pozice k bodu zahájení tisku první vrstvy modelu.

Další nesporná výhoda navazuje na již zmíněnou rychlost posunu trysky v ose Z. Rychlost pohybu ramen v ose Z je totiž naprosto stejná jako pohyb středové platformy s tryskou v osách X a Y. Delta design ramen umožňuje trysce provádět rychlé, přesné a plynulé pohyby. Právě plynulé pohyby jsou pro 3D tisk zásadní. Lineární přístup chodu v konvenčních modelech (Darwin, Mendel, Huxley) musí při změně směru tisku překonávat váhu samotné platformy, na níž je obvykle umístěn mimo trysky i extruder s krokovým motorkem. Motorky, které mají za úkol pohybovat s celým tímto vozíkem, musí kompenzovat vlastní setrvačnost pohyblivé základny, jejíž váha může mít způsobovat trhavé pohyby a ovlivňovat tak kvalitu samotného tisku. Akcelerace a postupné zpomalování pohybu vozíku vyžaduje pečlivou kontrolu vytlačování roztaveného plastu tryskou. Při delších posunech v horizontálním směru si tisk často vyžaduje i nakrátko úplné pozastavení vytlačování filamentu. V modelu delta pi je středová základna oproštěna od váhy extruderu, který je obvykle umístěn na konstrukčním rámu tiskárny. Tryska spolu s plastovým středovým dílem je jako celek mnohem lehčí a umožňuje tak změny směru proměnit v mnohem plynulejší pohyby.

Delta design také umožňuje, díky třem nezávisle zavěšeným ramenům, lépe tisknout kruhové a oblé tvary. V tiskárnách, které využívají kartézský souřadný systém, tisk probíhá ve dvou na sebe kolmých liniích. Tisk zaoblených tvarů je tak obtížnější a kvůli pouhým dvěma osám pohybu trysky bývá výsledek často křivě natištěn.

V tiskárně typu delta není žádný ze tří krokových motorků specializován pro určitou osu a tak tisk různými směry je vytvářen jejich pohybovou kombinací spolu s účinkem gravitace na plošinu trysky. Díky velké svobodě pohybu delta ramen tyto tiskárny dosahují větší přesnosti tisku ve všech různých směrech od osy X a Y. Koordinace všech tří motorků pro pohyb ramen je nicméně mnohem těžší na kalibraci než u dvojice motorků pro pohyb v kartézském souřadném systému. Kartézský systém nabízí velmi jednoduché řešení překladu tiskových informací pro mechanické uspořádání pohybů na Gcode. Pro překlad pohybů pro delta robotiku existuje již několik programů (např. Marlin), které tento úkol pomáhají zjednodušit.

Poslední drobnou výhodou je jednodušší stavba delta tiskárny (typy Rostock a Rostock Mini). Pro její konstrukci je potřeba i menší počet komponentů a také jejich sestavení bývá rychlejší oproti ostatním typům tiskáren s pravoúhlým typem tisku.

## 7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrhem nekomerční 3D tiskárny typu delta pi. Hlavní výhodou konstrukce tiskárny typu delta pi je odstranění nevýhod modelu tiskárny I3, používaném na ústavu UETE FEKT VUT v Brně, a to vnášení vibrací do tiskacího procesu posuvem vyhřívané podložky při tisku a absence jednoho z krokových motorů v ose Z, který již není zapotřebí. Pohyblivá podložka tiskárny I3 zde zprostředkovává manipulaci s modelem v horizontální rovině. U typu delta pi je horizontální pohyb prováděn zavěšením trysky na trojici delta ramen, tudíž je temperovaná podložka statická.

Cílem této práce bylo vytvořit model tiskárny spolu s vhodnou temperovanou podložkou s využitím počítačových systémů CAE, simulacemi optimalizovat modelové návrhy a sestavit mechanickou část tiskárny.

Úvodní část práce popisuje historii trendů ve vývoji 3D tiskáren na jednotlivých modelech RepRap projektu. V této části je popsána i technologie tisku FDM spolu s porovnáním dvou nejvíce používaných FDM materiálů (ABS a PLA).

V další části je proveden úvod k simulacím pomocí popisu používaného software, včetně teoretického úvodu do šíření tepla a proudění kapaliny. Stručně jsou popsány numerické metody konečných objemů pro zpracování simulací v programu SolidWorks Flow Simulation.

V praktické části jsou uvedeny a popsány jednotlivé typy realizací temperovaných podložek. Analýza teplotních profilů je provedena na variantě desky vyhřívané výkonovými rezistory a desky tvořené plošnými spoji. Realizace pomocí DPS se jeví dle výstupu analýzy výhodnější variantou pro aplikaci při stavbě tiskárny. Díky půdorysu konstrukce tiskárny ve tvaru rovnostranného trojúhelníku se nabízí realizace podložky kruhového tvaru. Z praktického hlediska dle výsledků simulací nejlépe vychází provedení dvojité vedené spirály (Obr. 5.20, 7.18), kde je vstup a výstup měděného meandru umístěn na okraji desky a je tedy možné zapojení signalizace LED diodou. Teplo je distribuováno od středu podložky k jejím okrajům, vzhledem k výhodnému tvaru kružnic je teplo snadněji přenášeno a není nutné dodávat tolik proudu jako při variantě s obdélníkovým meandrovým vytápěním. Distribuce proudové hustoty je rovnoměrnější a nevznikají tak na ostrých hranách meandru inflexe a nedochází ke zhušťování proudu.

Sestava tiskárny je nyní osazena temperovanou podložkou typu MK2, jež byla fyzicky vyrobena na UETE a testována termokamerou. Výsledky teplot prohřívání desky korespondují s výsledky simulací modelu.

Následující simulace se zabývají prouděním a přestupem tepla mezi jednotlivými

částmi tiskárny. V prvním bodě je zjišťováno šíření tepla způsobené pracovní teplotou krokových motorů NEMA 17. Pro lepší odvádění tepla od motorů je každý motor opatřen ventilátorem, u kterého je dle výsledků simulace důležité uvolnit oblast nasávání, a to oddálením spodní hranice rotoru od pracovní desky (Obr. 5.24).

Ze simulací prohřívání hrotu trysky je z výsledků patrná funkčnost izolační trubičky, anglicky nazývané "Heat Break". Teplo se přes zmenšenou oblast trubičky velmi špatně dostává do střední oblasti chladiče (Obr. 5.32). Žebrovitý chladič je opatřen ventilátorem, který mnohonásobně usnadňuje odvod přestupujícího tepla do okolí. Nevhodným řešením u této konstrukce je uchycení ventilátoru na hliníkový rámeček, jenž je ukotven přímo na topné těleso. Dochází tak k mírnému šíření tepla skrze rámeček až do vstupní části trysky. Ve snaze eliminovat toto šíření je uchycení rámečku na spodní vytápěný díl prováděno pouze přes dvě vyfrézované styčné plochy. Z výsledků simulace vychází, že ventilace chladiče větrákem zlepšuje ochlazování vrchní části (*Cold End*) o 90%. Trysku jsme podrobili zkušebnímu prohřátí a teplotu jednotlivých částí zaznamenali termokamerou. Teplotní profily fyzické trysky jsou prakticky shodné s výsledky simulací.

Při testování vlivu uzavření tiskárny do neprodyšného pláště byl nárůst teploty ve vnitřní oblasti o necelých 9°C oproti zcela otevřené konstrukci (Tabulka 5.6). Schopnost udržovat konstantní teplotu v oblasti tisku poskytuje výhodu při tisku s materiálem ABS, který je náchylný na deformace vlivem rychlého a nerovnoměrného ochlazování.

Přesnost 3D tisku na této tiskárně je dána součtem všech vlastností použitých dílů. V základě se odvíjí od průměru použité trysky, jenž je v tomto sestavení 0,4 mm. Dalšími ovlivňujícími faktory jsou nastavení mikrokrokování pro krokové motory, typ řemenice a její případná vůle a rychlost vytlačování filamentu extruderem v závislosti na poměru převodů hnacího motoru. Teoretická přesnost tiskárny je 0,1 mm.

Elektronika k ovládání 3D tiskárny byla vyvinuta ve spolupráci ústavů VUT UMEL a UETE v Brně Ing. Milanem Holíkem a Ing. Petrem Vyroubalem. Plastové díly byly vytištěny na stávajícím modelu tiskárny I3, umístěném na ústavu UETE, čímž se podstatně redukovala cena této tiskárny. Bylo zapotřebí dokoupit vodící tyče a řemenice spolu s ozubenými koly (Strojtechnik a FERONA Brno). Celkové náklady činily cca 6 000 Kč, což v porovnání s prodávanými modely nekomerčních tiskáren, které začínají na cca 17 000 Kč, je více než uspokojivé řešení.

Pro další vývoj tiskárny by bylo vhodné postoupit v realizaci a optimalizaci kruhové temperované podložky, opatřit rám tiskárny konstrukčním prvkem pro zavěšení špulky se strunou taveného materiálu a popřípadě zlepšit kompaktnost a mobilitu přístroje umístěním elektroniky na samotnou konstrukci.

# LITERATURA

- [1] *RepRap*. RepRapWiki [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.reprap.org/wiki/RepRap](http://www.reprap.org/wiki/RepRap).
- [2] *RepRap Project*. Wikipedia: The Free Encyclopedia [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.en.wikipedia.org/wiki/RepRap\\_Project](http://www.en.wikipedia.org/wiki/RepRap_Project)
- [3] SEHNÁLEK, Stanislav. *3D tiskárna na bázi projektu RepRap*. Posterus: portál pre odborné publikovanie ISSN 1338-0087[online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=16065>
- [4] ANGRISH, Atin. *3D Printing In Biomedical Applications: Overview And Opportunities*. [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.meddeviceonline.com/doc/d-printing-in-biomedical-applications-overview-and-opportunities-0001](http://www.meddeviceonline.com/doc/d-printing-in-biomedical-applications-overview-and-opportunities-0001)
- [5] CORRIGAN, Riona. *Rostock Mini 3D Printer*. 2013. Dostupné z: [www.eej.ulst.ac.uk](http://www.eej.ulst.ac.uk). Final Year Report. University of Engineering, Ulster. Vedoucí práce Mr. McCrum.
- [6] SEVERA, T. *Analýza teplotního profilu hot bed a hot end u 3D tiskárny pomocí CAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 108 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vyroubal.
- [7] BARTOŠ, Radko. *Návrh temperovaného stolu pro FDM 3D tiskárnu s využitím simulace MKP*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 57 s. příloh. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
- [8] KOZUBKOVÁ, Milada. VŠB - Technická univerzita Ostrava. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti* [online]. první, 2011. Ostrava, 2011 [cit. 2014-12-17]. ISBN978-80-248-2491-8.
- [9] JAHODA, M. *Počítačová dynamika tekutin: Užitečný nástroj pro inženýry*. [online]. s. 38 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [tresen.vscht.cz/uchi/uploads/pedagogika/bezpecnostni\\_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf](http://tresen.vscht.cz/uchi/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf)
- [10] MAJER, Dušan. Katedra Výrobních systémů: *Technologie Rapid Prototyping FDM*. [online]. 2013 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.kvs.tul.cz/rapid](http://www.kvs.tul.cz/rapid)
- [11] *SolidVision: SolidWorks - 3D CAD navrhování* [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/solidworks/>
- [12] CHILSON, Luke. The Difference Between ABS and PLA for 3D Printing. [online]. 2013 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.protoparadigm.com/news-updates/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing/>
- [13] *ABS and PLA Comparison Table*. [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.botfeeder.ca/abs-vs-pla/](http://www.botfeeder.ca/abs-vs-pla/)
- [14] *Fused Deposition Modeling (FDM)*. In: [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling](http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling)
- [15] *O 3D tisku: Informace o technologiích 3D tisku*. In: [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/](http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/)
- [16] RepRapWiki: PCB Heatbed. [online]. 2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.reprap.org/wiki/PCB\\_Heatbed](http://www.reprap.org/wiki/PCB_Heatbed)
- [17] *Cheap 3D filaments* [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: [www.cheap3dfilaments.com/](http://www.cheap3dfilaments.com/)



- [18] JEŽEK, J. *Mechanika tekutin*. České vysoké učení technické v Praze, 2000. 151 stran.
- [19] VYROUBAL, Petr, Jiří Maxa. *Trojrozměrné modelování a simulace*. Vysoké učení technické v Brně. 204 stran.
- [20] HIRZEL, Timothy. *Arduino: PWM* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>
- [21] *Pulzně šířková modulace - PWM* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: [http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Marek/pic-html/od5/od5\\_8.htm](http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Marek/pic-html/od5/od5_8.htm)
- [22] THIEBAUT, D. 2011. *Introduction to the Arduino: Tutorial* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: [http://cs.smith.edu/dftwiki/index.php/Tutorial:\\_Introduction\\_to\\_the\\_Arduino](http://cs.smith.edu/dftwiki/index.php/Tutorial:_Introduction_to_the_Arduino)
- [23] *Arduino: Aduino Mega 2560* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>

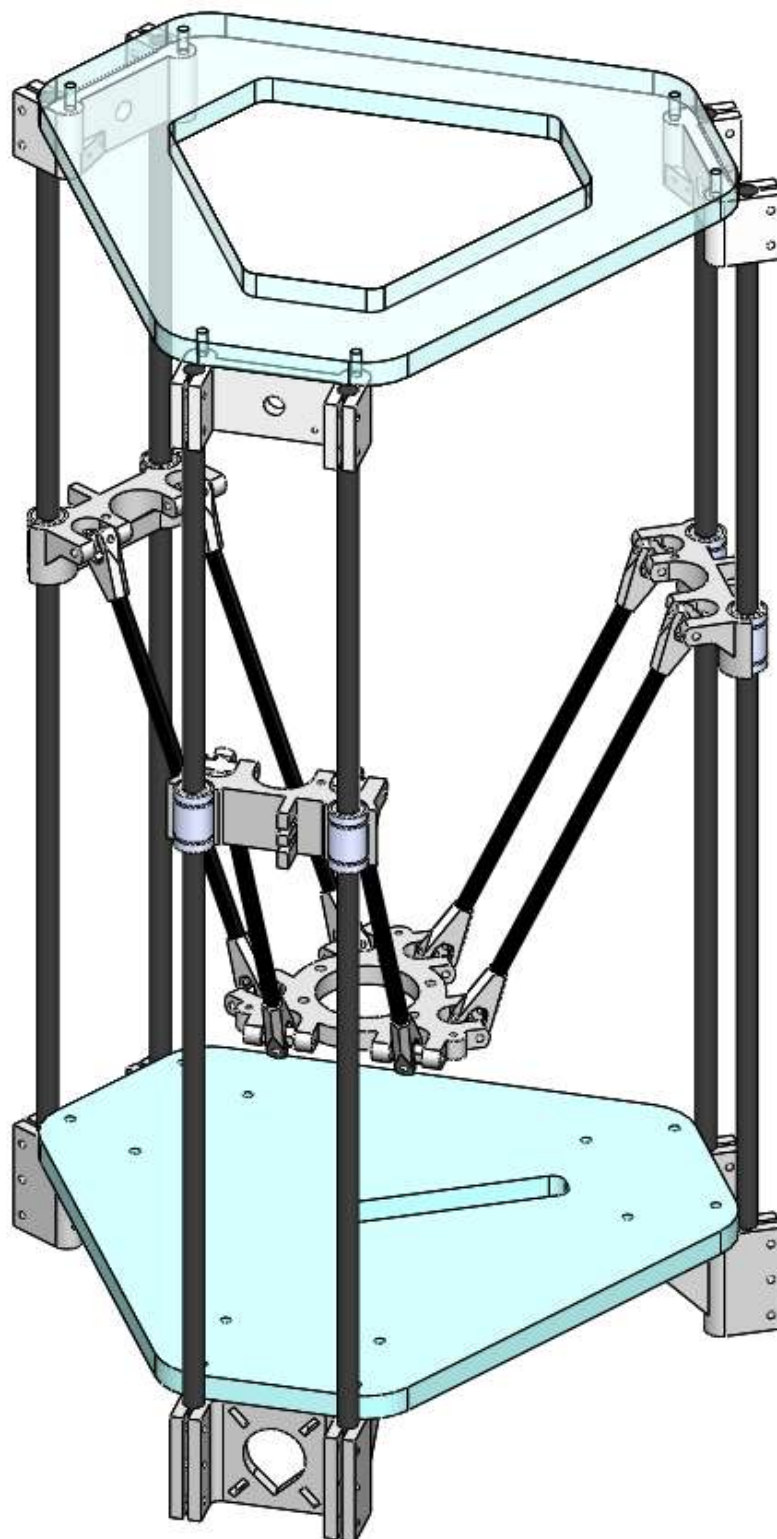
## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

čas	$t$	s
teplota, teplota tekutiny	$T$	K
teplota	$\vartheta$	°C
rychlost	$v$	m·s <sup>-1</sup>
frekvence	$f$	Hz
hmotnost	$m$	kg
objemová hustota, hustota tekutiny	$\rho$	kg·m <sup>-3</sup>
hustota tepelného toku	$q$	W·m <sup>-2</sup>
množství tepla	$Q$	J
rychlost tekutiny	$u$	m·s <sup>-1</sup>
hybnost	$p$	kg·m·s <sup>-1</sup>
vnitřní energie	$e$	J
přívod či odvod tepla vztažený na jednotku objemu	$Q_H$	J·m <sup>-3</sup>
difusní tok tepla	$q_i$	m <sup>2</sup> ·K
tensor vazkých napětí	$\tau_{ij}$	Pa
indexy u veličin udávají sumaci dle tří směrů souřadnic (Einsteinova sumace)	$ij$	-
napětí	$U$	V
proud	$I$	A
odpor	$R$	Ω
výkon, teplotní tok	$P$	W

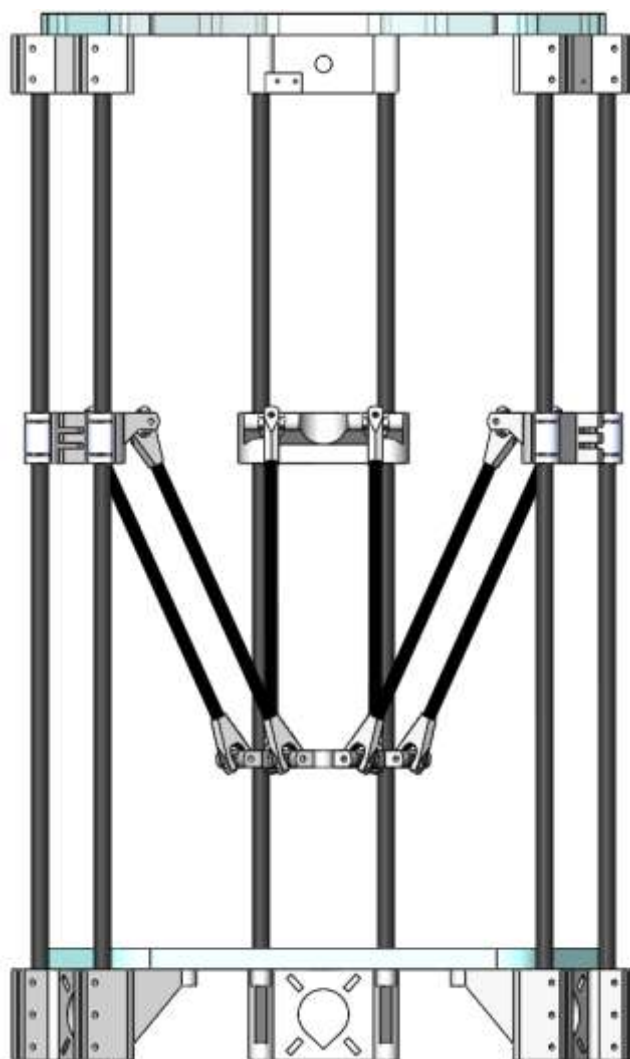
Reynoldsovo kritické číslo	$Re$	-
obsah plochy	$S$	$m^2$
součinitel přestupu tepla	$\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
součinitel teplotní vodivosti	$a$	$m^2 \cdot s^{-1}$
měrná tepelná kapacita	$c_p$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
měrná entalpie	$i$	$kJ \cdot kg^{-1}$
Hamiltonův operátor	$\Delta$	$m^{-1}$
Planckova konstanta úměrnosti	$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$	$J \cdot s$
Stefanova-Boltzmannova konstanta	$\sigma = 5,67037 \cdot 10^{-8}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
rychlost světla	$c = 299\,792\,458$	$m \cdot s^{-1}$

3D	Three-dimensional Space, trojrozměrné prostředí.
UV	Ultraviolet, ultrafialové záření
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene, Akrylonitril-butadien-styren
CAE	Computer Aided Engineering, počítačová podpora strojírenství.
CAD	Computer Aided Design, počítačová podpora projektování.
CFD	Computational Fluid Dynamics, výpočet dynamiky tekutin.
CNC	Computer Numerical Control, počítačové řízení strojů.
DIY	Do It Yourself, udělej si sám.
DPS	Printed Circuit Board, deska plošných spojů.
FDM	Fused Deposition Modeling, modelování aditivní metodou.
GNU	GNU's Not Unix!, GNU Není Unix!.
GPL	General Public Licence, všeobecná veřejná licence.
MKO	metoda konečných prvků
PC	Polycarbonate, polykarbonát
PLA	Polyactic Acid, kyselina polymléčná.
RepRap	Replicating Rapid Prototyper, rychlá replikace prototypů.
SI	International System of Units, mezinárodní soustava jednotek fyzikálních veličin.
SLA	Stereolithography, stereolitografie.
SLS	Selective Laser Sintering, selektivní laserové tavení.

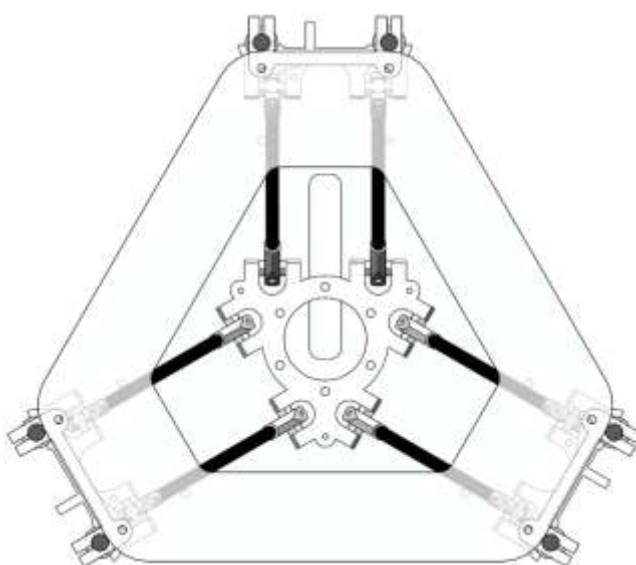
## A MODEL ZAŘÍZENÍ



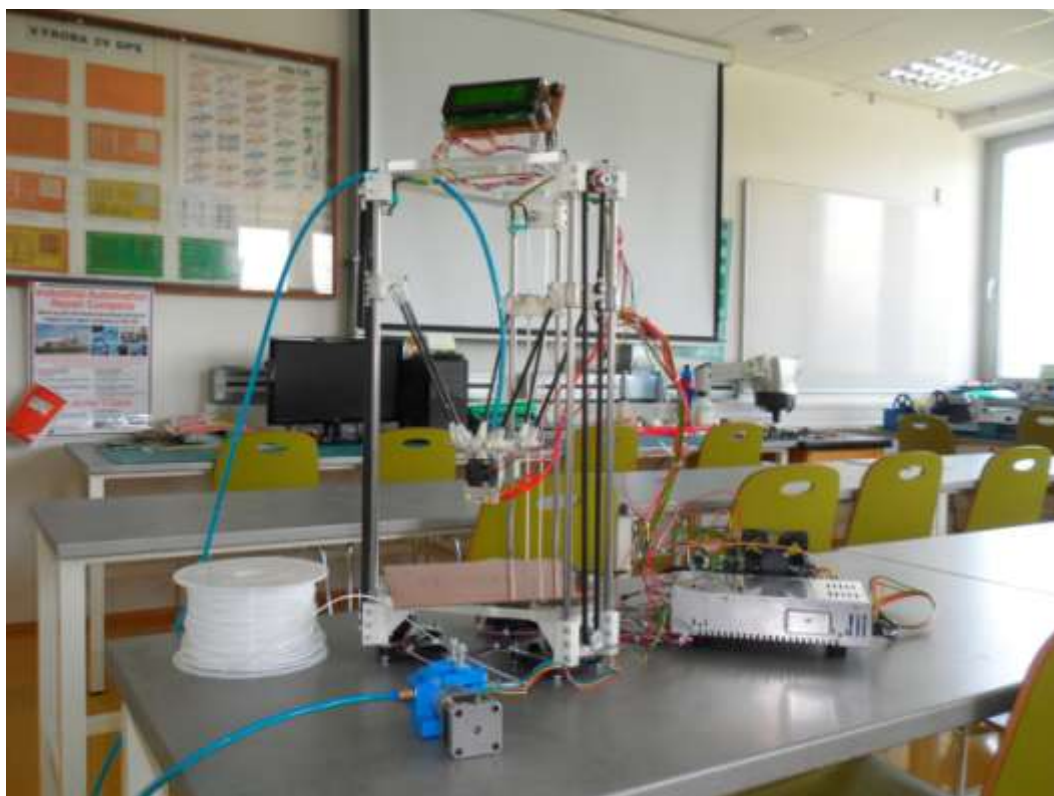
Obr. 7.1: Trojrozměrný model 3D tiskárny typu delta pi.



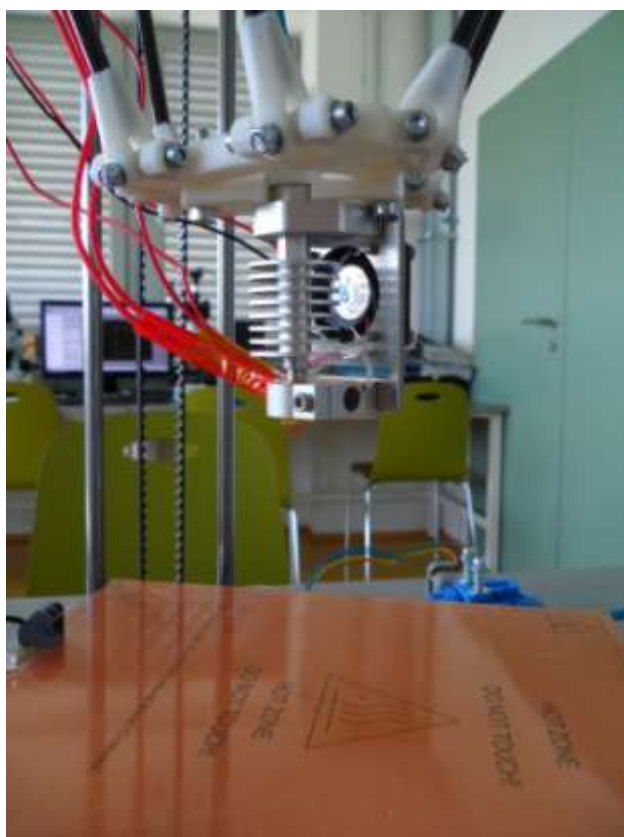
Obr. 7.2: Trojrozměrný model 3D tiskárny typu delta pi, pohled zboku.



Obr. 7.3: Trojrozměrný model 3D tiskárny typu delta pi, pohled shora.



Obr. 7.4: Fotografie fyzické sestavy tiskárny delta pi se všemi komponentami.

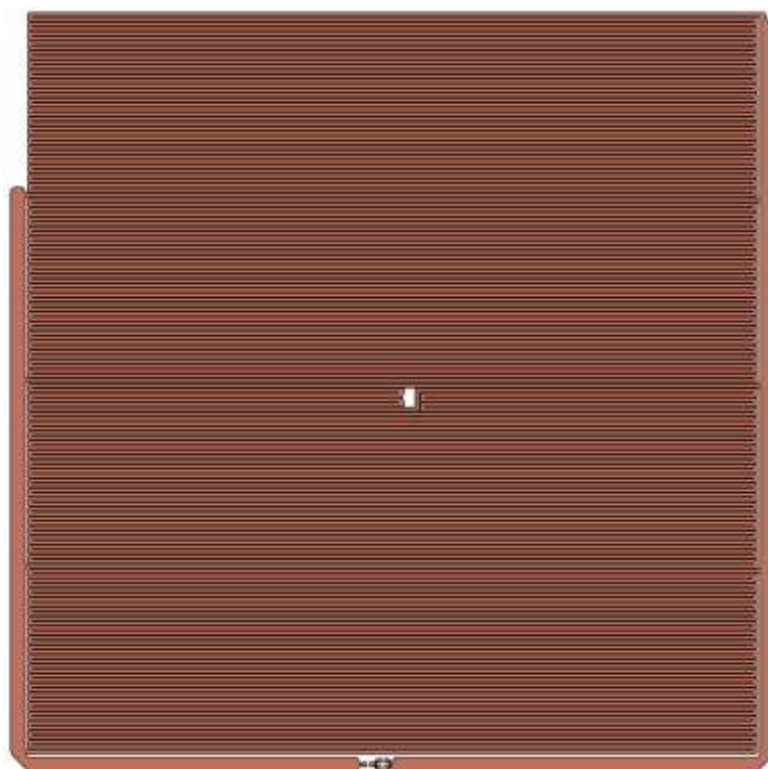


Obr. 7.5: Fotografie trysky a temperované podložky tiskárny delta pi.

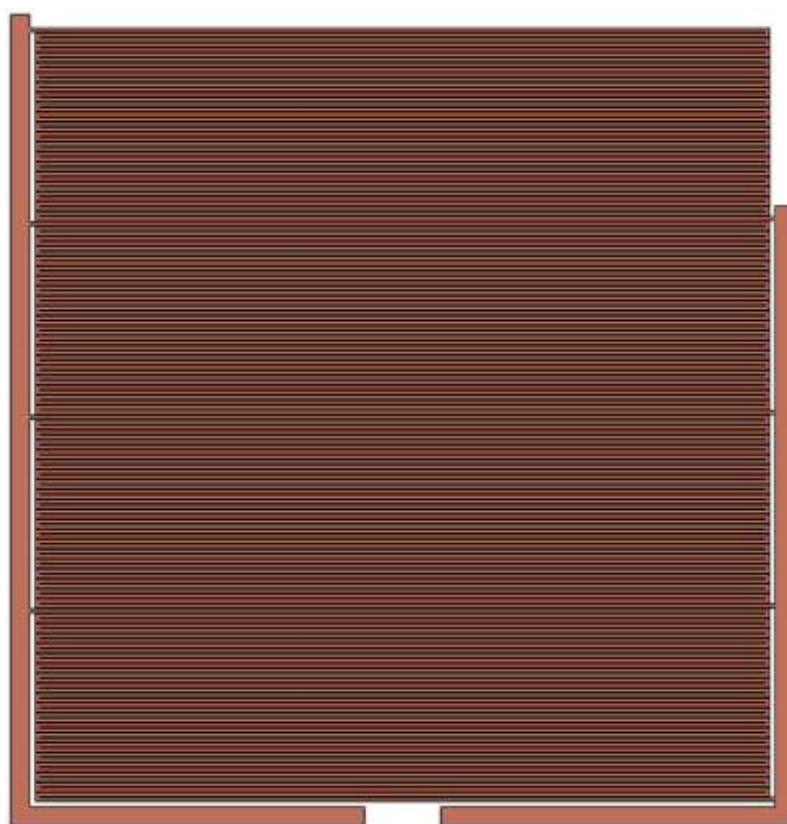
## B SEZNAM SOUČÁSTEK



Obr. 7.6: Tištěné konstrukční díly 3D tiskárny typu delta pi.



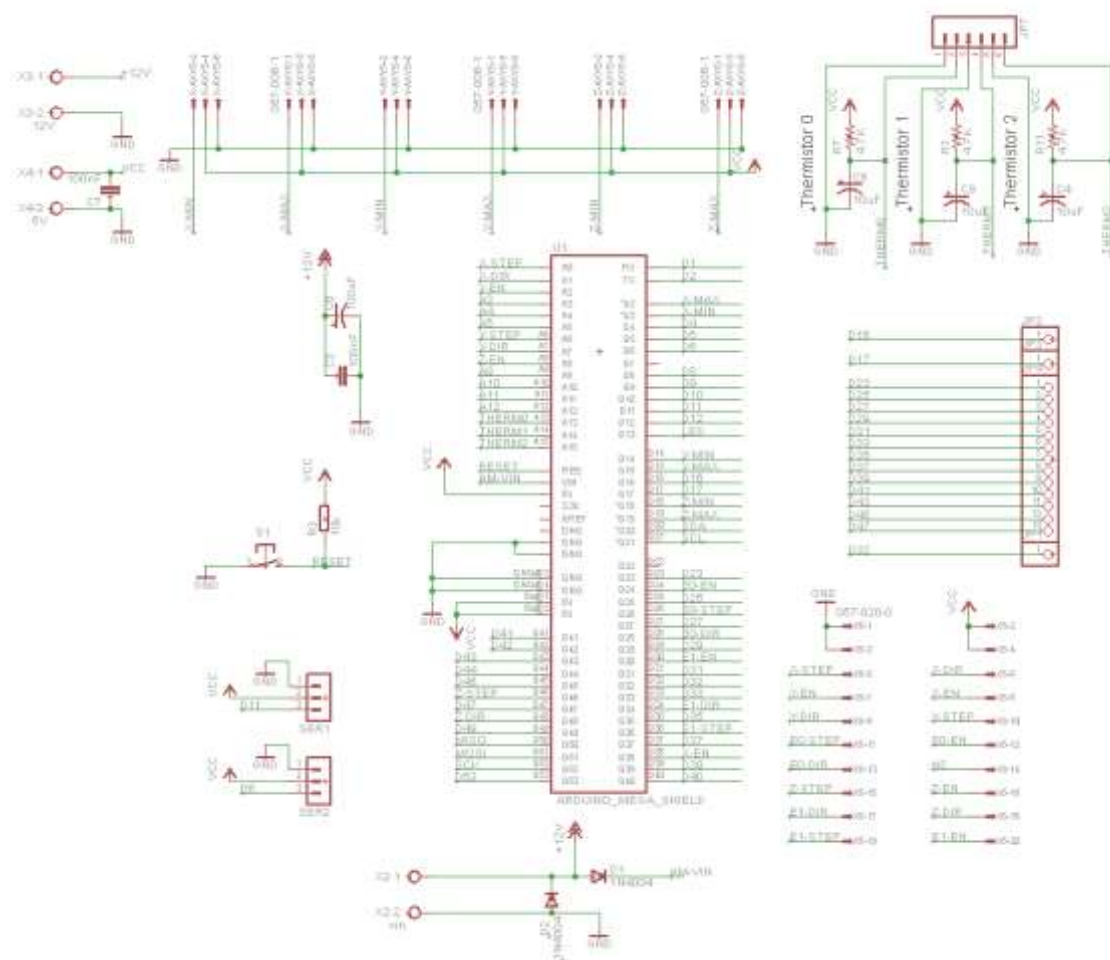
Obr. 7.7: Měděný meandr temperované podložky DPS.



Obr. 7.8: Zjednodušený měděný meandr temperované podložky DPS.





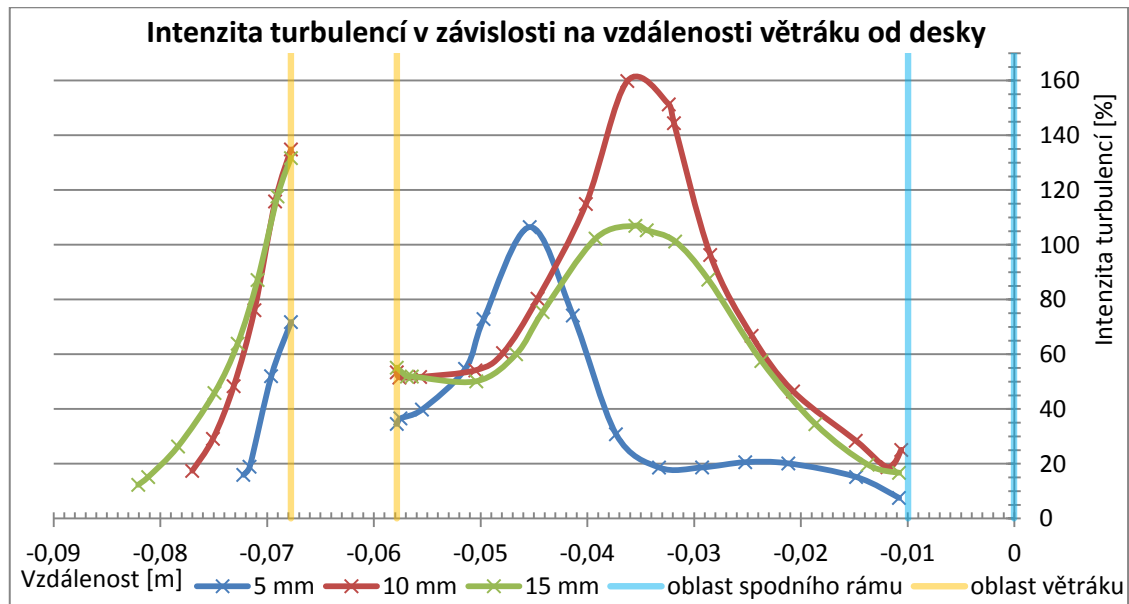


Obr. 7.11: Schéma zapojení komunikačního modulu Arduino.

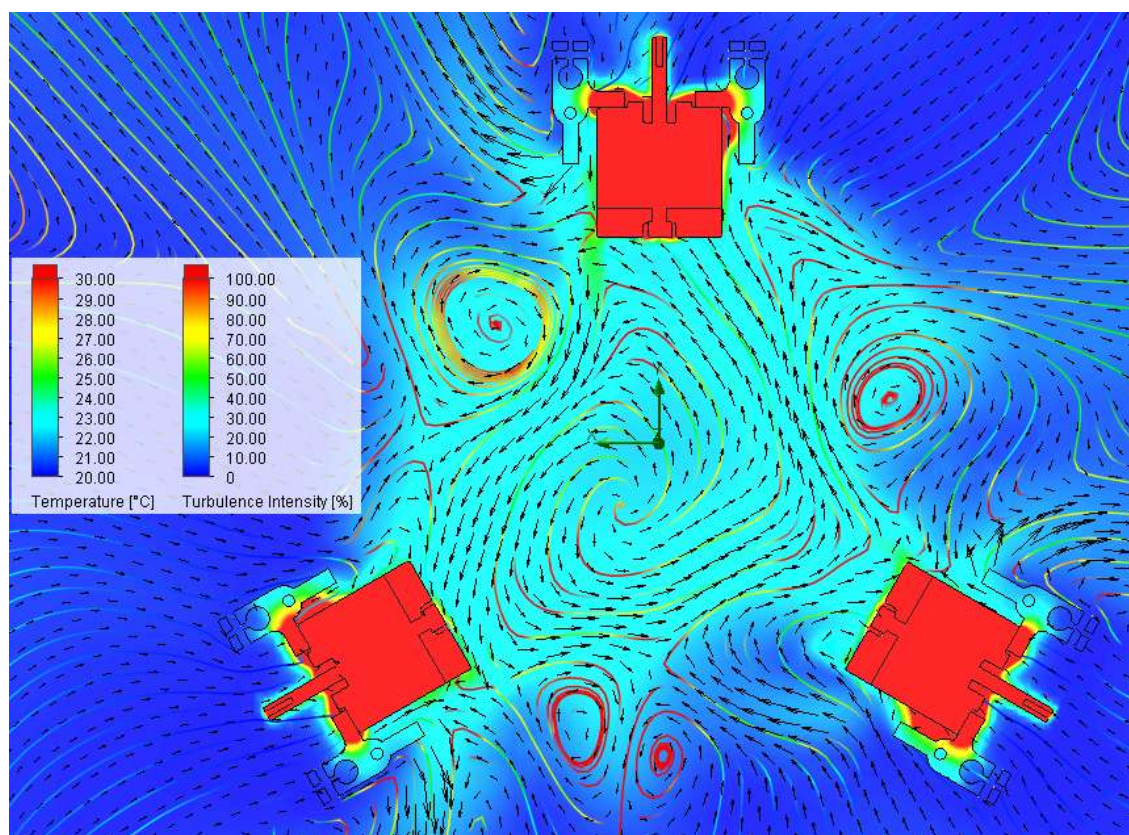
Tabulka 7.1: Tabulka použitých součástí tiskárny.

Název	Počet	Kategorie	Material
Úchyt motoru	3	tištěné	ABS
Horní úchyt	3	tištěné	ABS
Jezdec	3	tištěné	ABS
Střední část	1	tištěné	ABS
U-klob	12	tištěné	ABS
Střed kloubu	12	tištěné	ABS
Úchyt trysky	1	tištěné	ABS
Rám tiskárny	2	řezané	plexisklo
Hlazená tyč M8 492mm	6	Mechanika	ocel
Tyčka M6 166 mm	6	Mechanika	tvrzený plast
Lineární ložisko LM8UU	6	Mechanika	
Ložisko 608ZZ	3	Mechanika	
Ozubená řemenice T5	3	Mechanika	
Uzubený řemen T5	3x1m	Mechanika	guma
Motor NEMA 17	3	Elektronika	
Ventilátor 70x70x10	3	Elektronika	
Ventilátor 30x30x15	1	Elektronika	
Extruder	1	Elektronika	
Tryska J-head	1	Elektronika	
M3 šroubky (různé délky)	67	Mechanika	nerez
M3 matky	46	Mechanika	nerez
M3 podložky	79	Mechanika	nerez
Endstop	3	Elektronika	
Rezistor 10k	3	Elektronika	
Vyhřívaná podložka	1	Elektronika	
Bowden	1,5 m	Ostatní	guma

## C SIMULACE

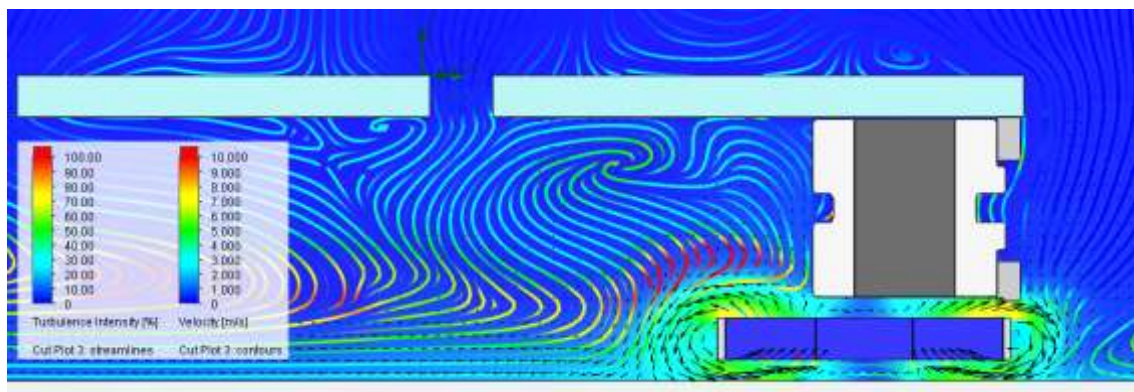


Obr. 7.12: Graf intenzity turbulencí v bezprostřední blízkosti chlazeného motoru ventilátorem.

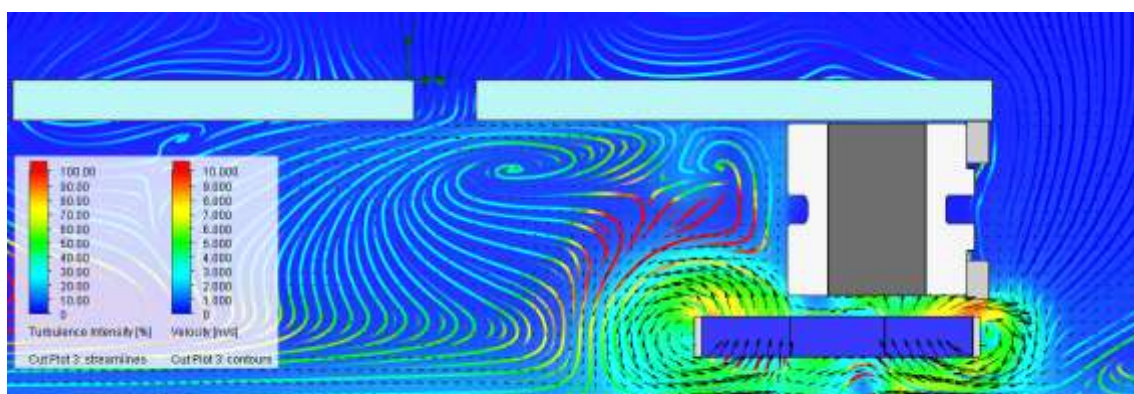


Obr. 7.13: Grafické znázornění rozložení teploty mezi třemi vyntilovanými motory.

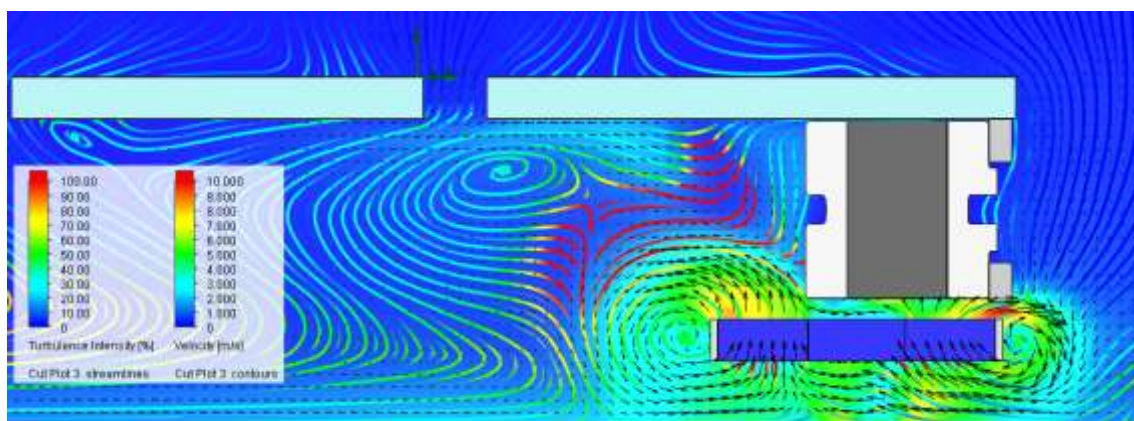




(a) 5 mm

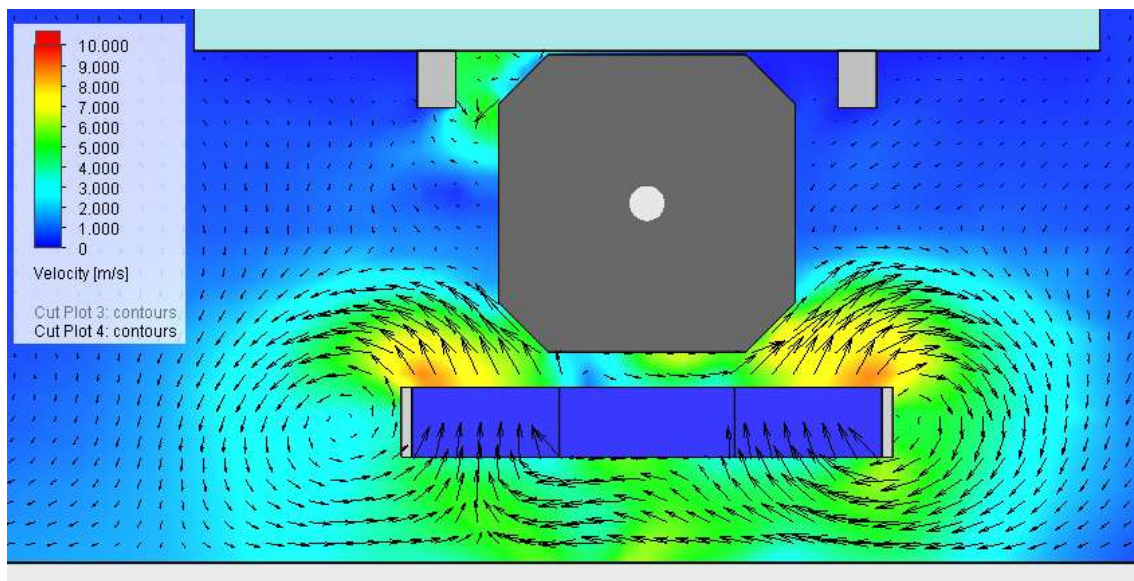


(b) 10 mm

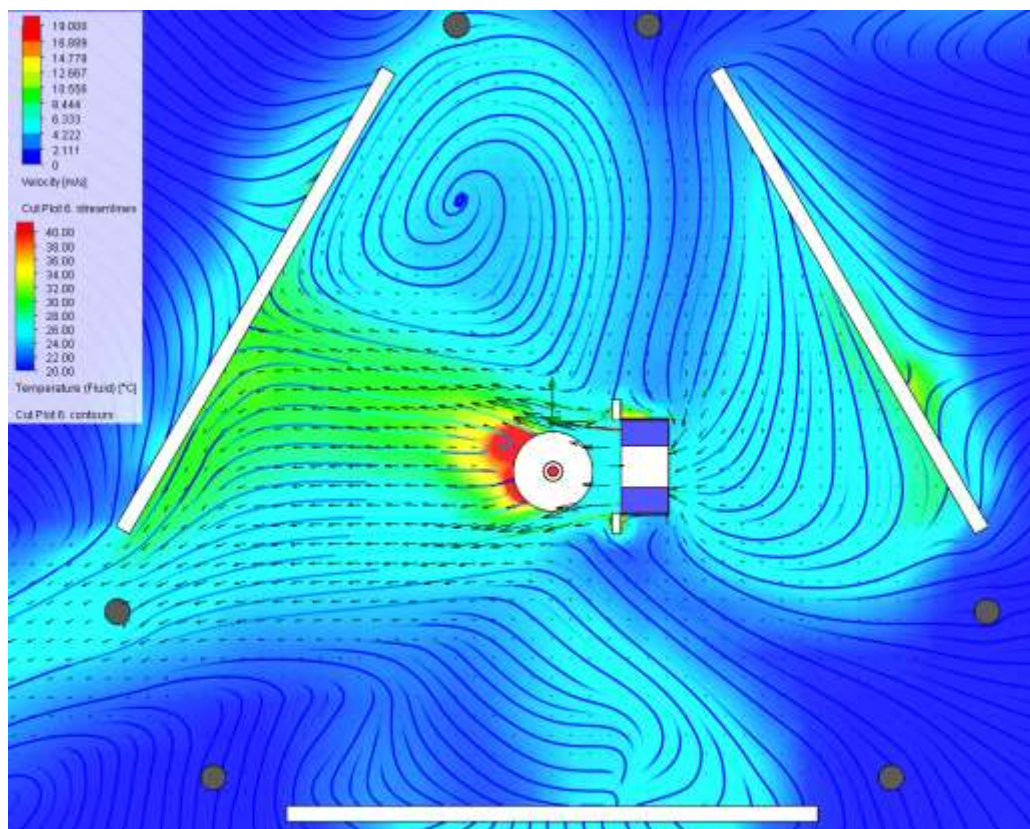


(c) 15 mm

Obr. 7.14: Grafické zobrazení intenzity proudění vzduchu ventilátorem motoru v závislosti na vzdálenosti od desky.

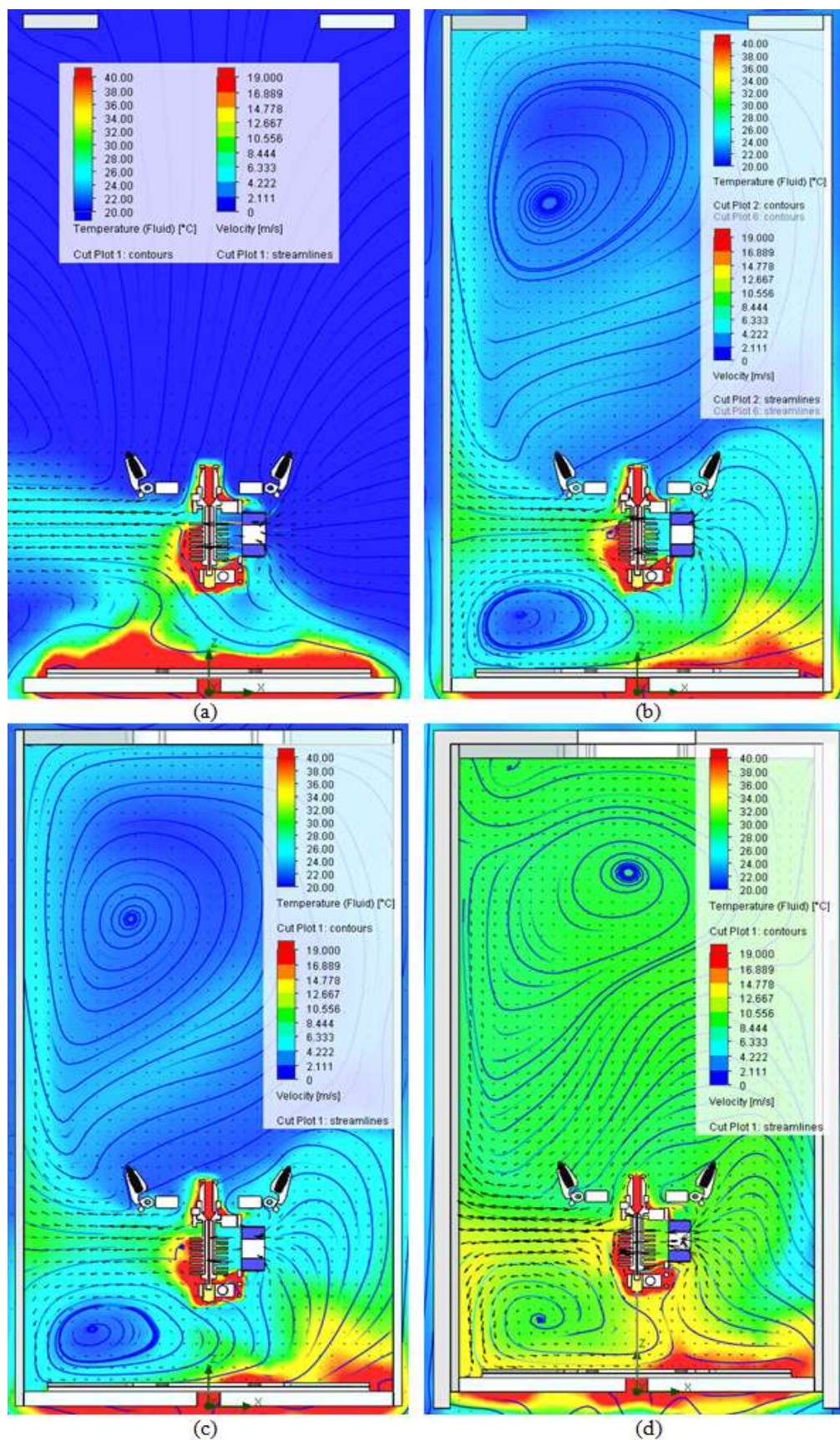


Obr. 7.15: Grafické znázornění proudění vzduchu ventilátorem okolo motoru - čelní zobrazení.



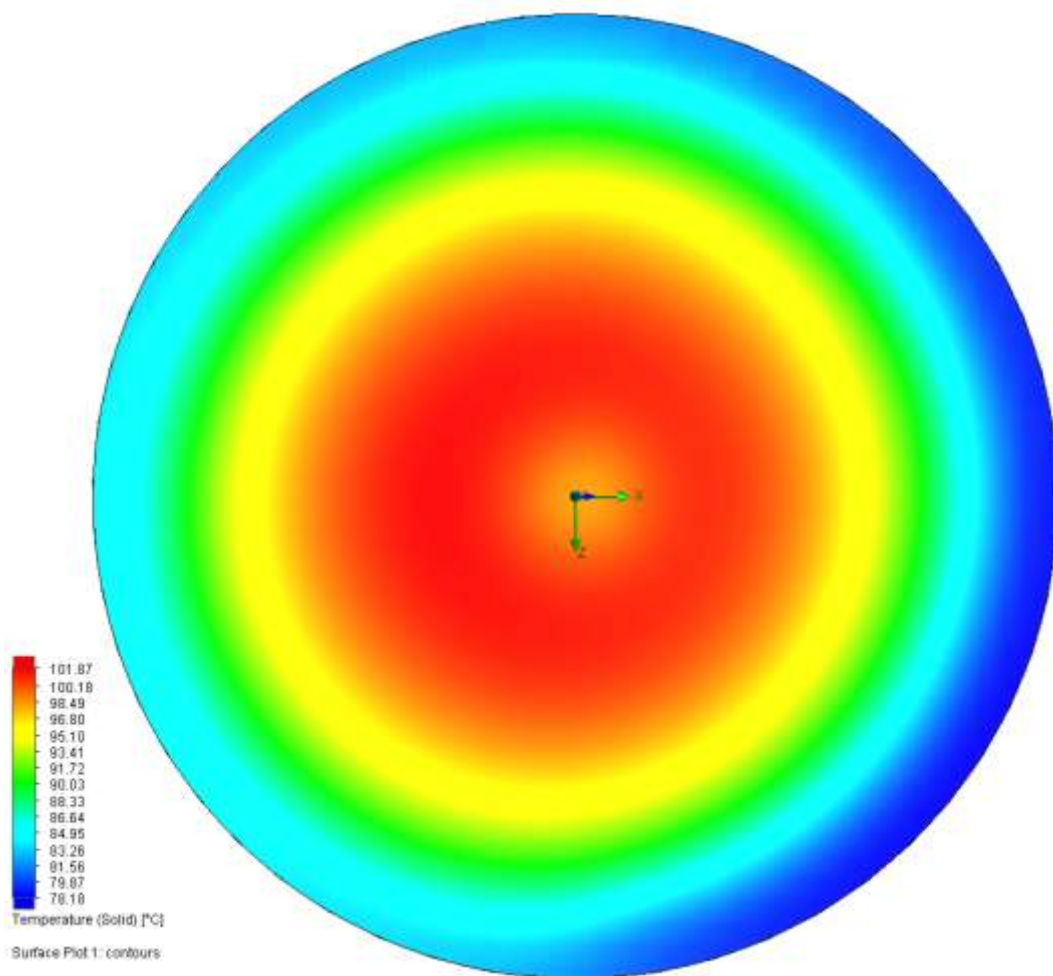
Obr. 7.16: Simulace proudění teplého vzduchu mezi stěnami tiskárny.



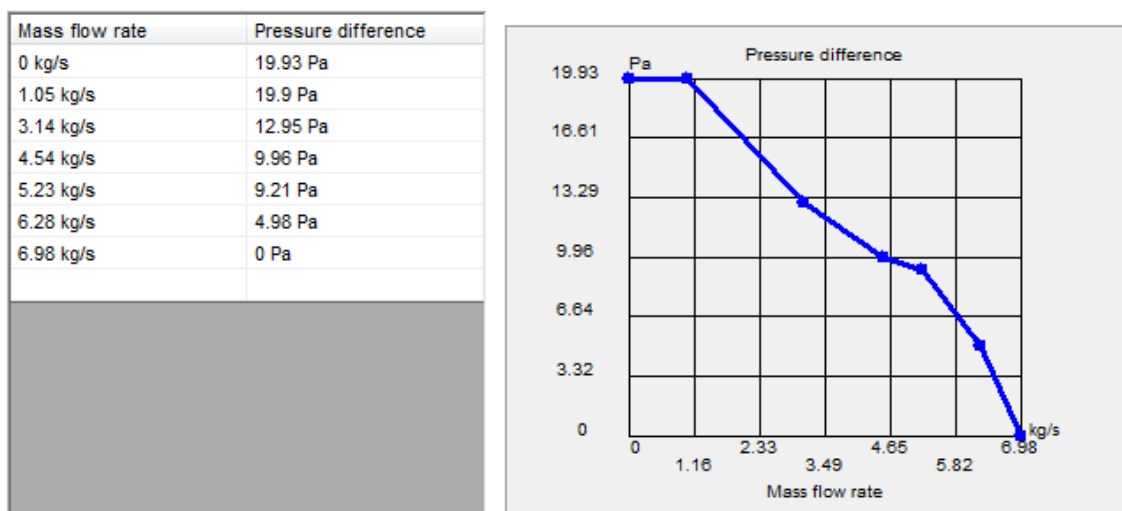


Obr. 7.17: Simulace proudění tepla v otevřené (a), uzavřené s dírou (b), uzavřené (c) a zcela uzavřené (d) tiskárně.

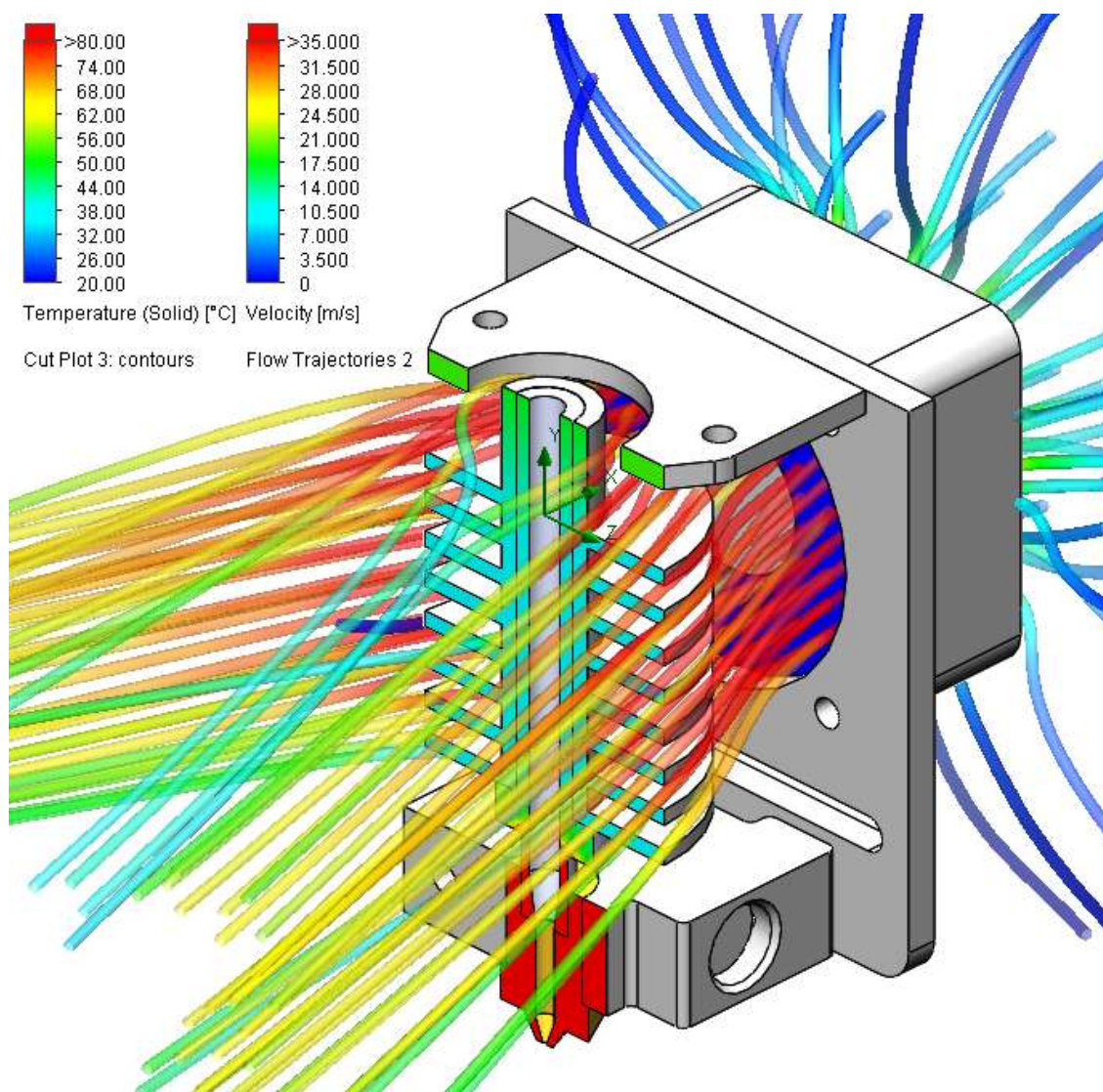




Obr. 7.18: Teplotní profil temperované podložky DPS vyhříváné dvojité vinutou spirálou.



Obr. 7.19: Ukázka implementace charakteristiky Mass Flow Rate při vytváření charakteristického modelu ventilátoru MC70101V1-0000-A99.




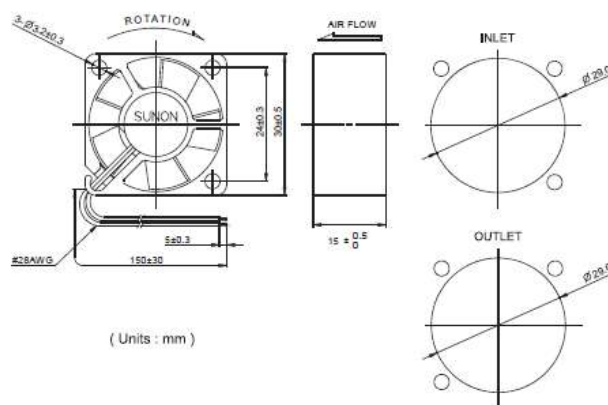
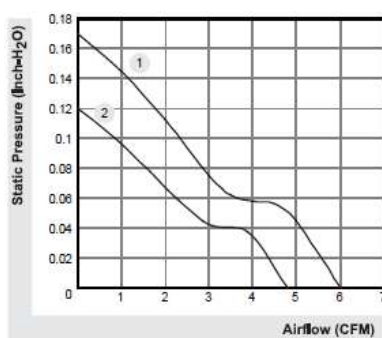
Obr. 7.20: Schéma proudění vzduchu z ventilátoru v žebrovitém chladiči trysky.

30x30x15 mm

4.8~6.0 CFM



	Bearing ● VAPO	Rating Voltage (VDC)	Power Current (mA)	Power Consumption (WATTS)	Speed (RPM)	Air Flow (CFM)	Static Pressure (Inch-H <sub>2</sub> O)	Noise (dBA)	Weight (g)	Curve
MC30150V1-0000-A99	●	5	114	0.57	8500	6.0	0.17	27.0	13.5	1
MC30150V2-0000-A99	●	5	75	0.37	7000	4.8	0.12	20.0	13.5	2
MC30151V1-0000-A99	●	12	54	0.65	8500	6.0	0.17	27.0	13.2	1
MC30151V2-0000-A99	●	12	37	0.45	7000	4.8	0.12	20.0	13.2	2



\*All model could be customized. Please contact with Sunon Sales.


\*Specifications are subject to change without notice. Please Visit SUNON web site at <http://www.sunon.com> for update information.

Obr. 7.21: Datasheet ventilátoru Sunon MC30151V1-0000-A99.

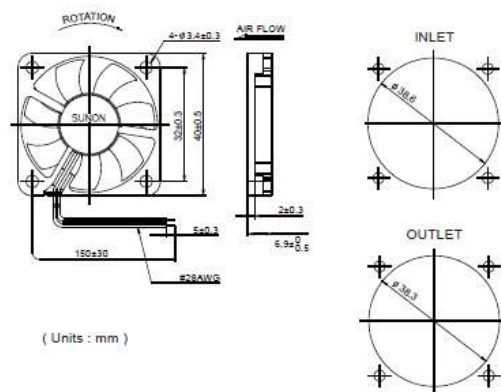
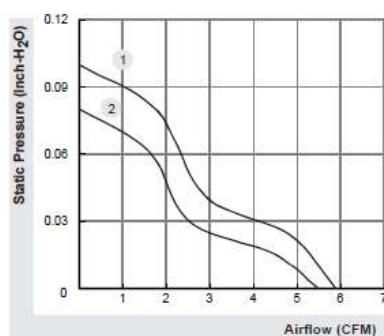
40x40x6 mm

5.5~5.9 CFM



	P/N	Bearing	Rating Voltage (VDC)	Power Current (mA)	Power Consumption (WATTS)	Speed (RPM)	Air Flow (CFM)	Static Pressure (Inch-H <sub>2</sub> O)	Noise (dBA)	Weight (g)	Curve
	MC40060V1-0000-A99	● VAPO	5	90	0.5	7000	5.9	0.10	32.0	7.5	1
	MC40060V2-0000-A99	●	5	70	0.4	6000	5.5	0.08	26.0	7.5	2

※Preliminary specification for reference



\*All model could be customized. Please contact with Sunon Sales.


\*Specifications are subject to change without notice. Please Visit SUNON web site at <http://www.sunon.com> for update information.

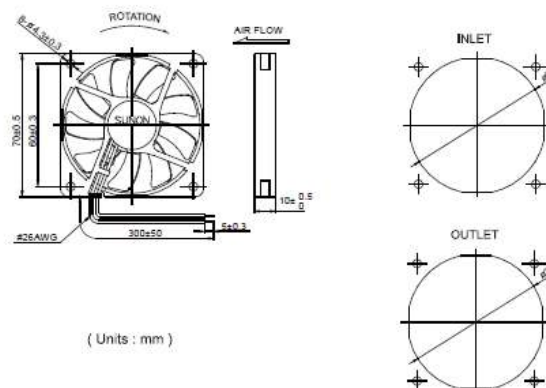
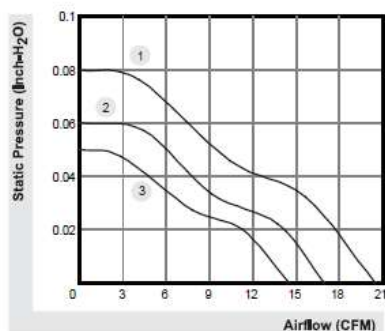
Obr. 7.22: Datasheet ventilátoru Sunon MC40060V2-0000-A99.

70x70x10 mm

14.5~20.5 CFM



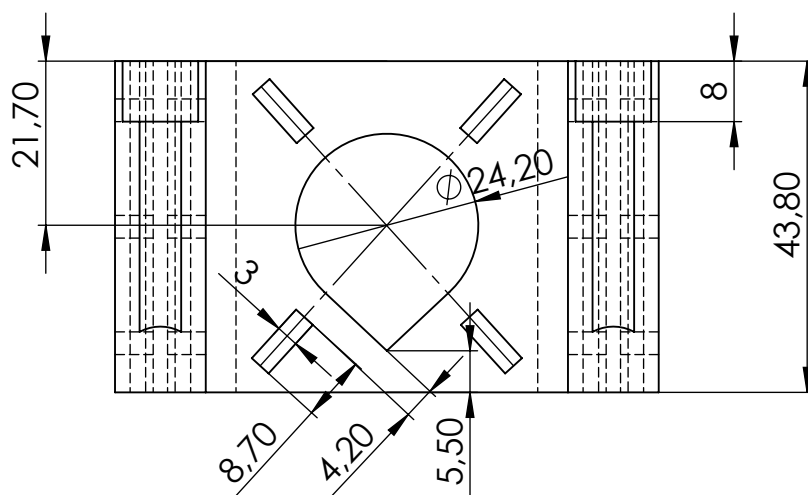
	Bearing	Rating Voltage (VDC)	Power Current (mA)	Power Consumption (WATTS)	Speed (RPM)	Air Flow (CFM)	Static Pressure (Inch-H <sub>2</sub> O)	Noise (dBA)	Weight (g)	Curve
MB70101V1-0000-A99	● VAPO	12	138	1.66	3000	20.5	0.08	28.0	29.0	1
MB70101V2-0000-A99	●	12	90	1.08	2500	17.0	0.06	24.5	29.0	2
MB70101V3-0000-A99	●	12	60	0.72	2100	14.5	0.05	20.5	29.0	3



\*All model could be customized. Please contact with Sunon Sales.

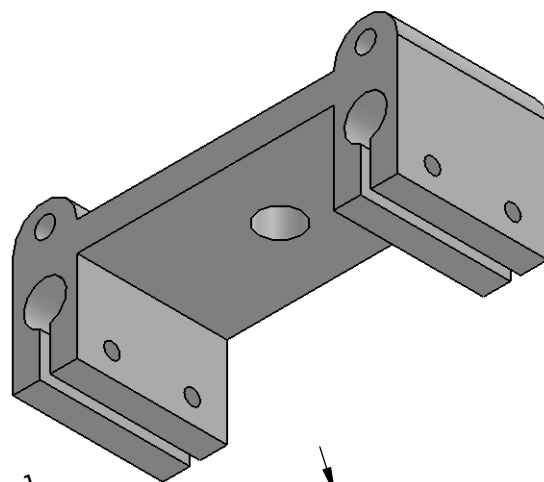
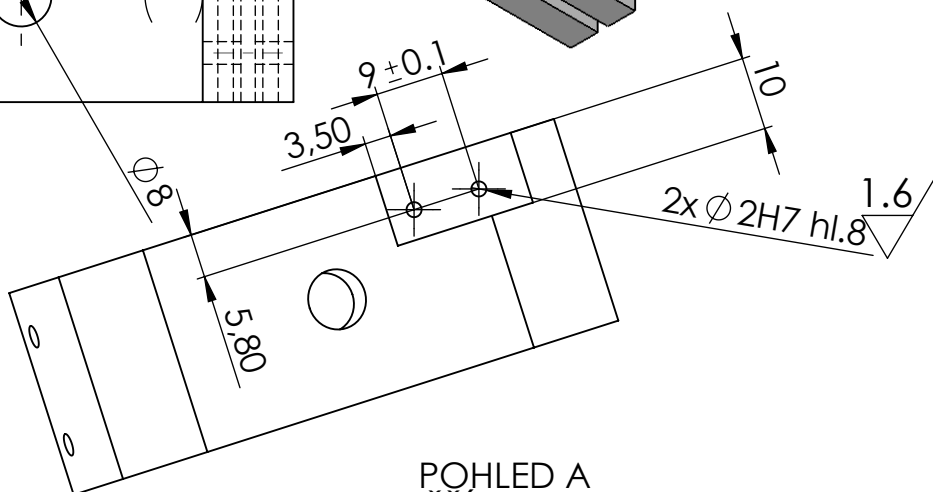
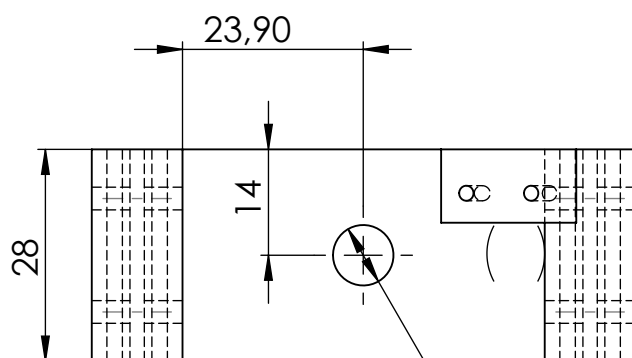
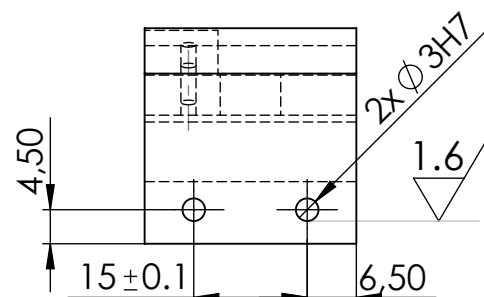
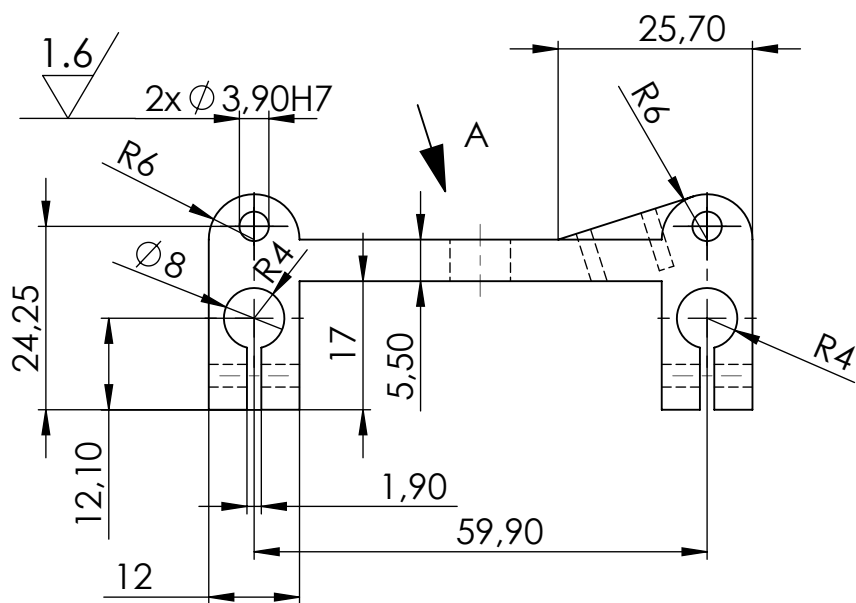
\*Specifications are subject to change without notice. Please Visit SUNON web site at <http://www.sunon.com> for update information.

Obr. 7.23: Datasheet ventilátoru Sunon MC70101V1-0000-A99.



LIST 1 Z 1 LISTŮ

3.2/ ✓



POHLED A  
MĚŘITKO 1 : 1

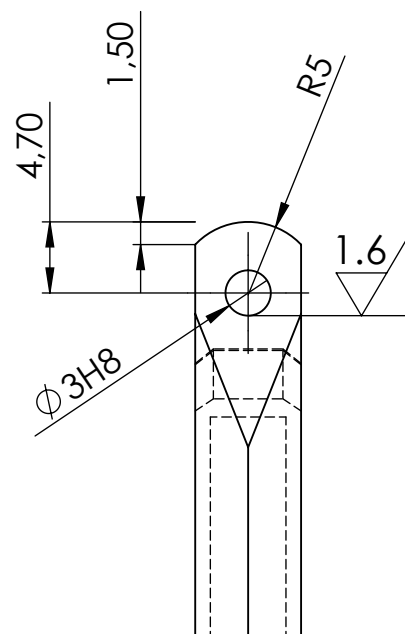
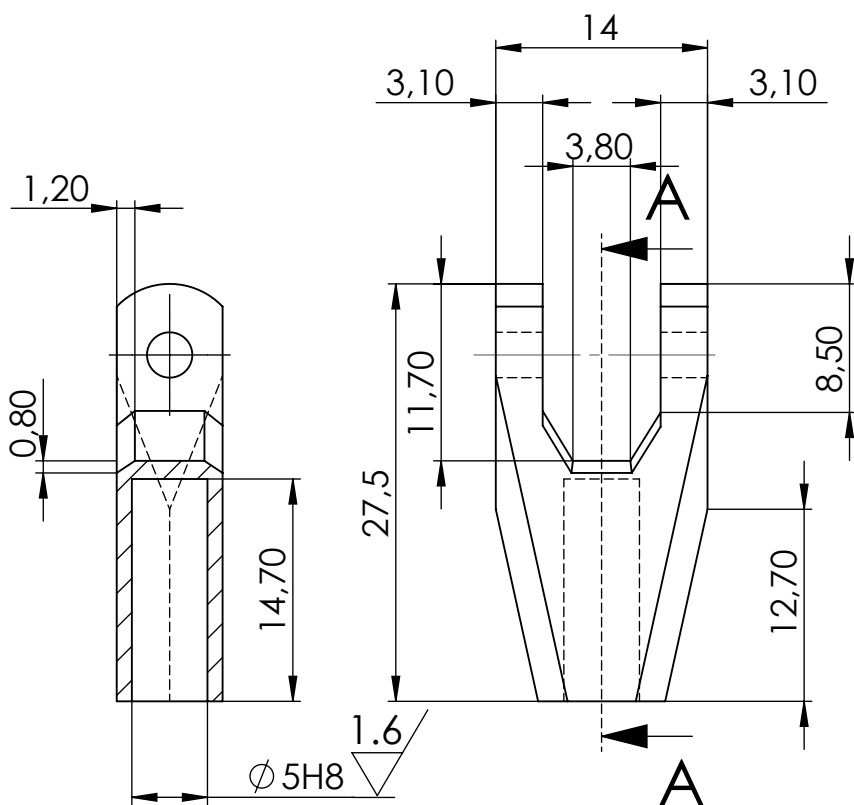
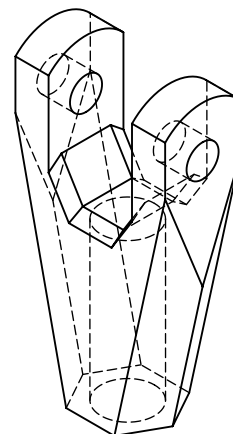
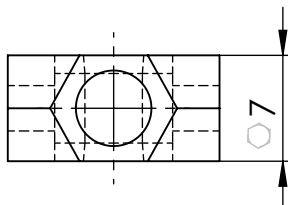
Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
NAVRHL									
PŘEZKOUSEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									
SolidWorks edice pro školství. Slouží jen pro instrukce.						Č. VÝKRESU		úchyty nahoře	
HMOTNOST:						MĚŘITKO:1:1		LIST 1 Z 1 LISTŮ	
								A4	



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:						OPRACOVÁNÍ:						ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY						NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU										ZMĚNA											
																		NÁZEV:																					
NAVRHL																																							
PŘEZKOUSEL																																							
SCHVÁLIL																																							
VÝROBA																																							
Z. JAKOSTI																		Č. VÝKRESU										jezdec										A4	
																		HMOTNOST:										MĚŘÍTKO:1:1										LIST 1 Z 1 LISTŮ	

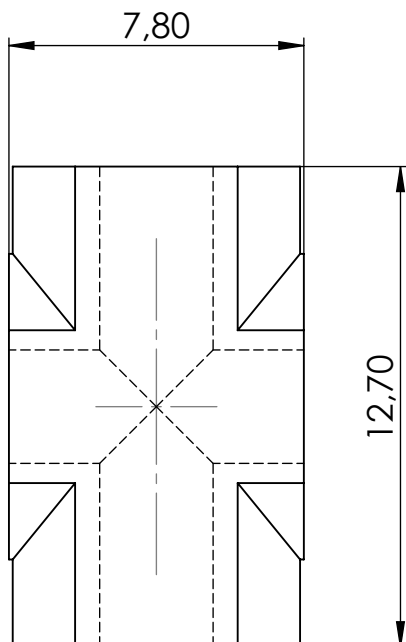
3.2 / (✓)



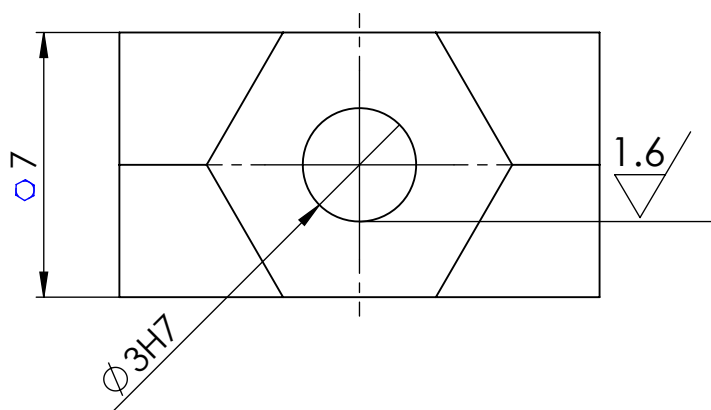
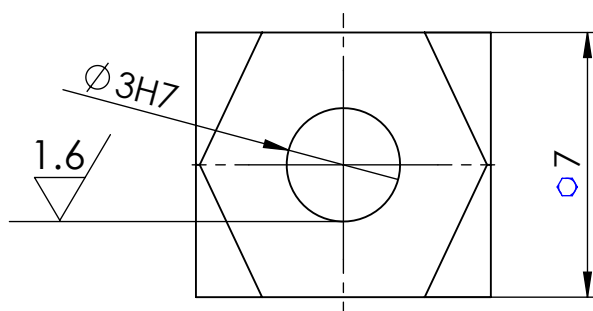
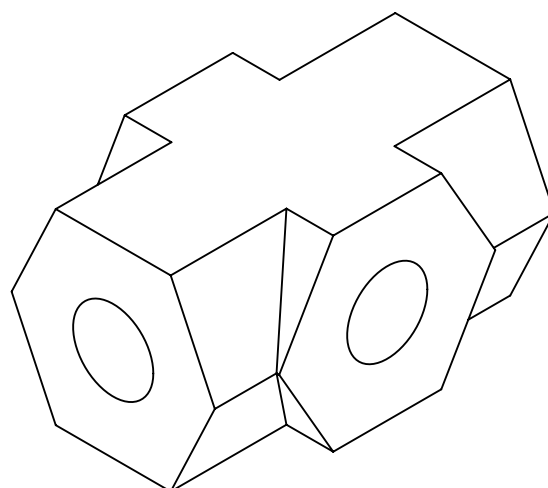
ŘEZ A-A

Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
NÁZEV	PODPIS	DATUM	NÁZEV:			
NAVRHL						
PŘEZKOUSEL						
SCHVÁLIL						
VÝROBA	<b>SolidWorks edice pro školství.</b>					
Z. JAKOSTI	<b>Slouží jen pro instrukce.</b>			Č. VÝKRESU	U kloub	A4
HMOTNOST:			MĚŘÍTKO:2:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ		

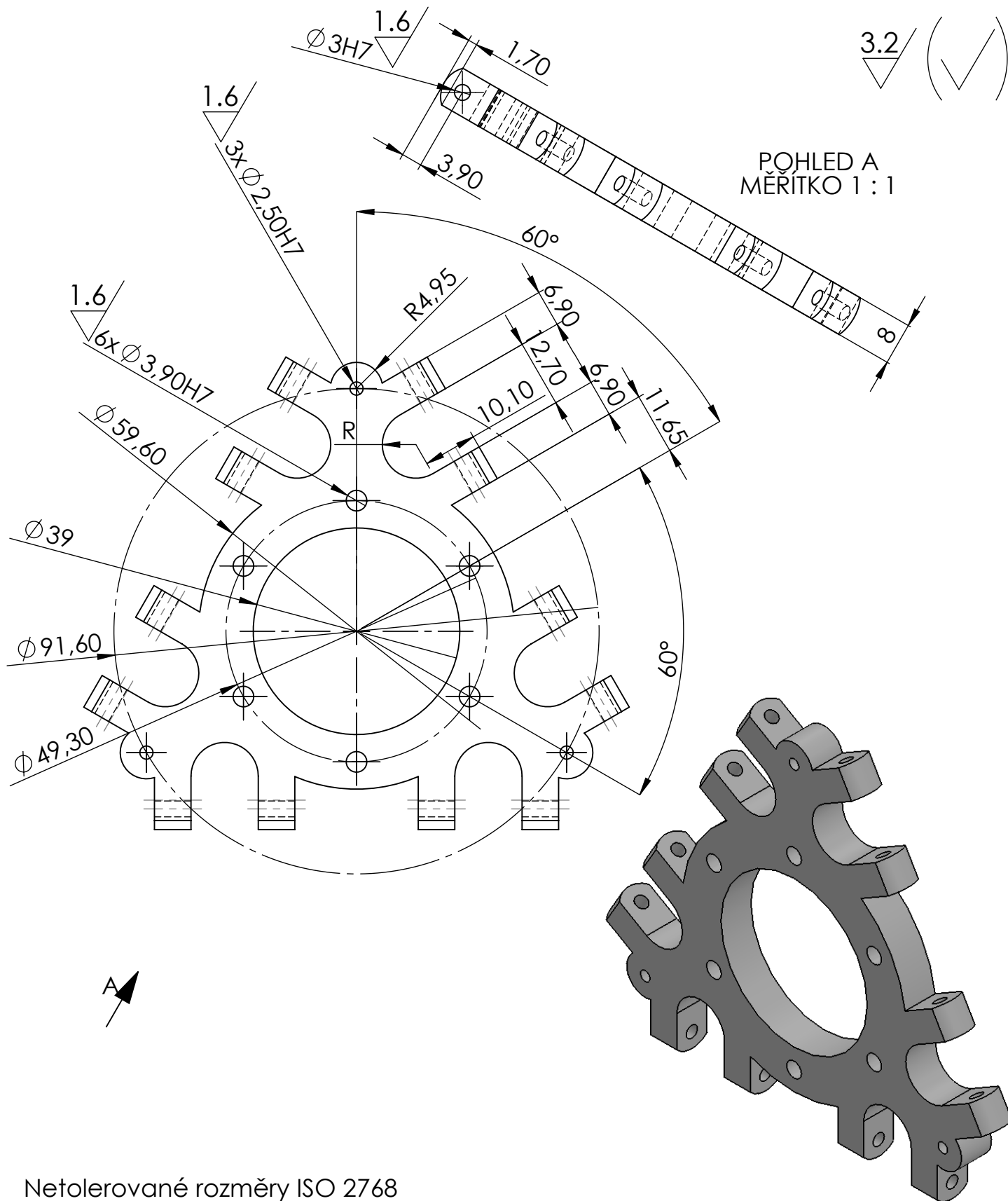


3.2 / (✓)

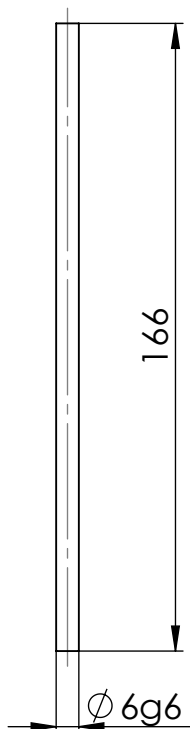


Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
NAVRHL									
PŘEZKOUSEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									
SolidWorks edice pro školství. Slouží jen pro instrukce.						Č. VÝKRESU		kloub	
						MĚŘÍTKO:2:1		A4	
HMOTNOST:						LIST 1 Z 1 LISTŮ			



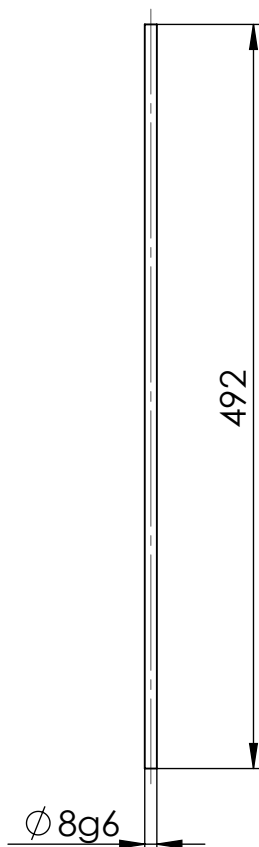
POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV						NÁZEV:			
PODPIS									
DATUM									
NAVRHL									
PŘEZKOŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									
SolidWorks edice pro školství. Slouží jen pro instrukce.						Č. VÝKRESU			
						střed tiskárny			
						A4			
HMOTNOST:						MĚŘITKO:1:1			
						LIST 1 Z 1 LISTŮ			



Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
NAVRHL						tyčka ramene			
PŘEZKOUSEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI						Č. VÝKRESU		A4	
						MĚŘÍTKO:1:2		LIST 1 Z 1 LISTŮ	
				HMOTNOST:					

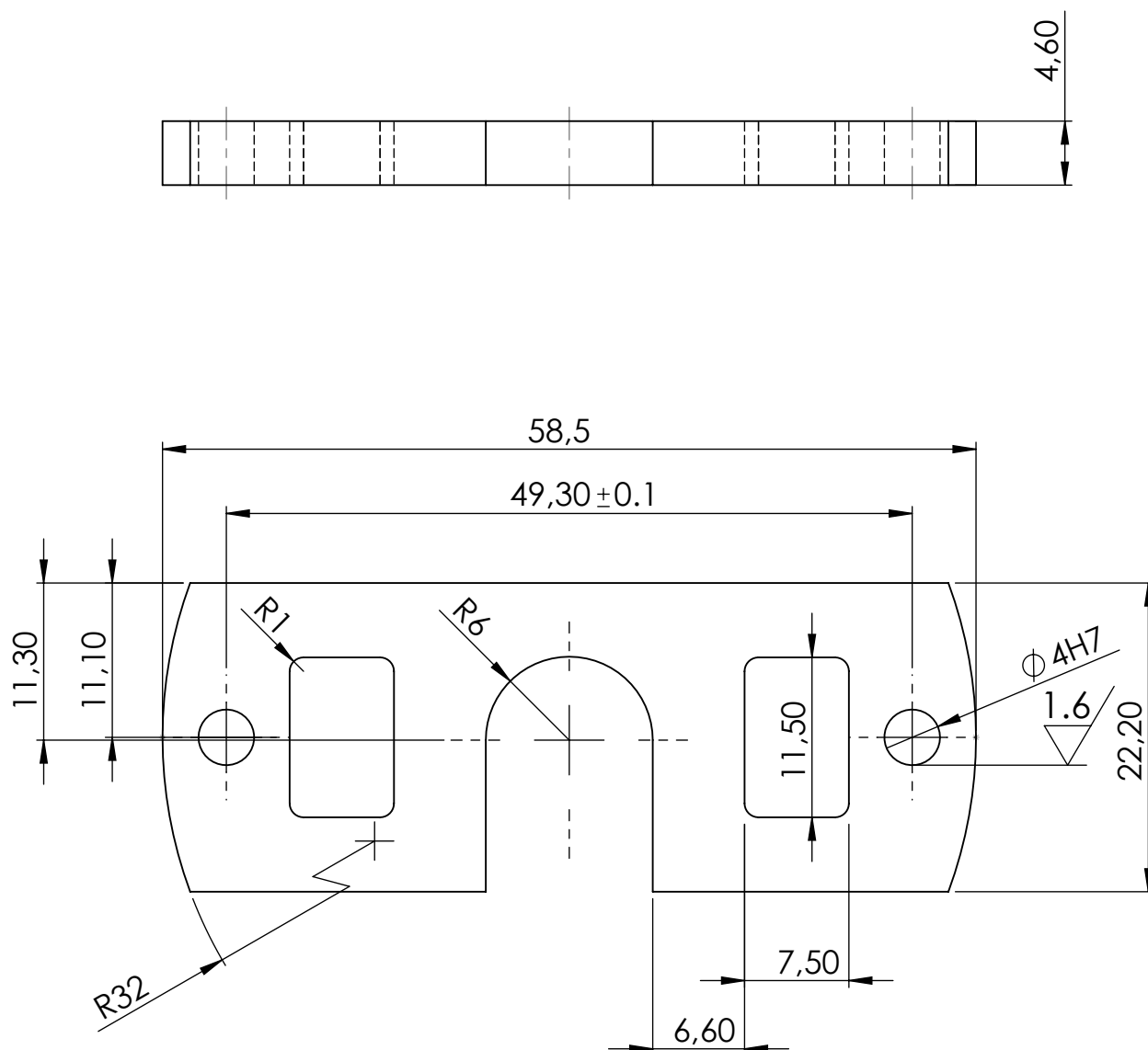
**SolidWorks edice pro školství.**  
**Slouží jen pro instrukce.**



Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
NAVRHL									
PŘEZKOŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									
<b>SolidWorks edice pro školství.</b> <b>Slouží jen pro instrukce.</b>						Č. VÝKRESU		tyč pilře	
						MĚŘÍTKO:1:5		A4	
HMOTNOST:								LIST 1 Z 1 LISTŮ	

3.2 / (✓)

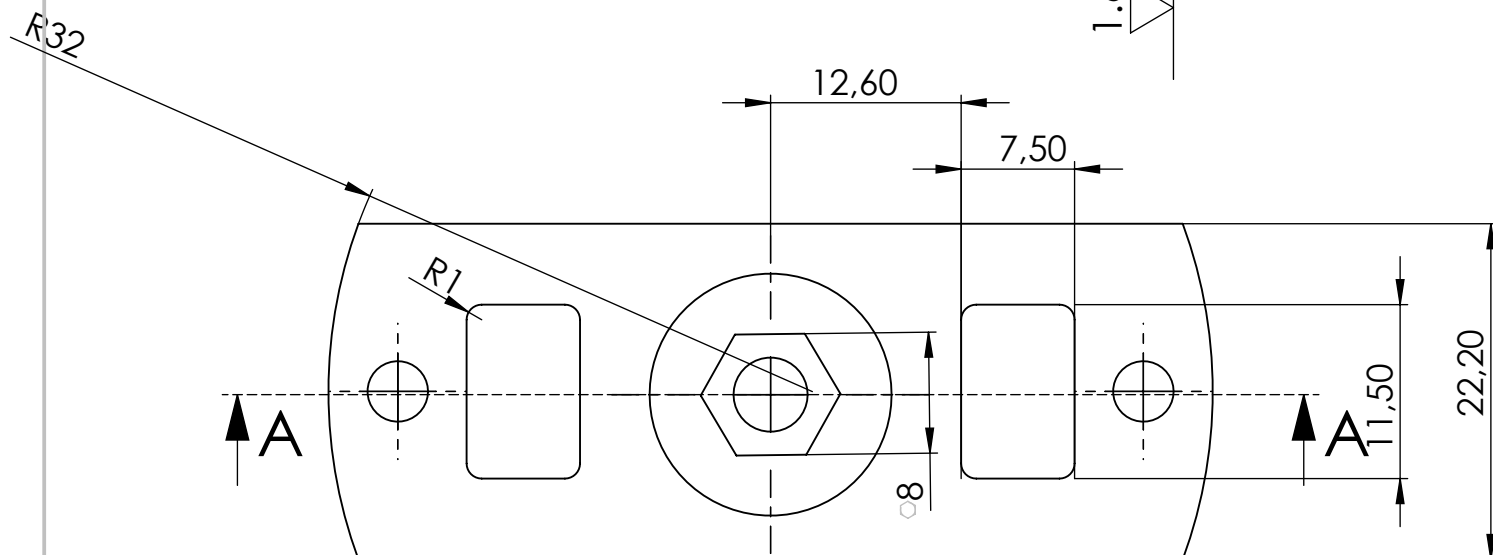
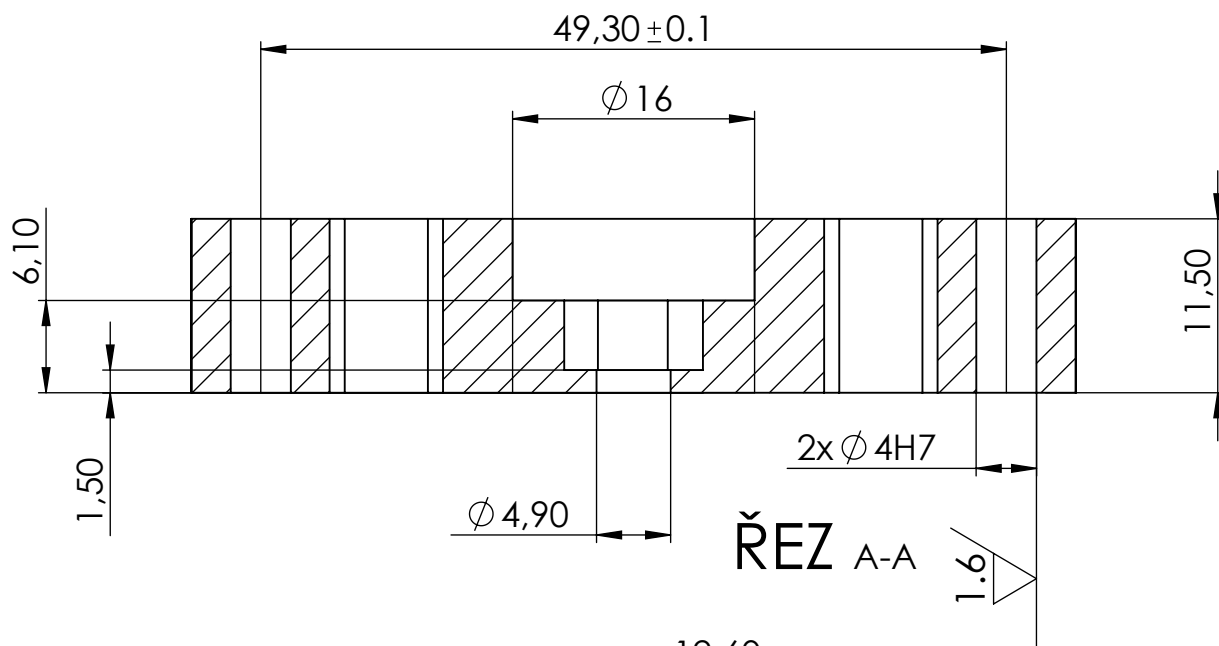


Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
NAVRHL									
PŘEZKOUŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									
SolidWorks edice pro školství. Slouží jen pro instrukce.						Č. VÝKRESU		úchyt trysky 1	
						MĚŘÍTKO: 2:1		A4	
HMOTNOST:						LIST 1 Z 1 LISTŮ			

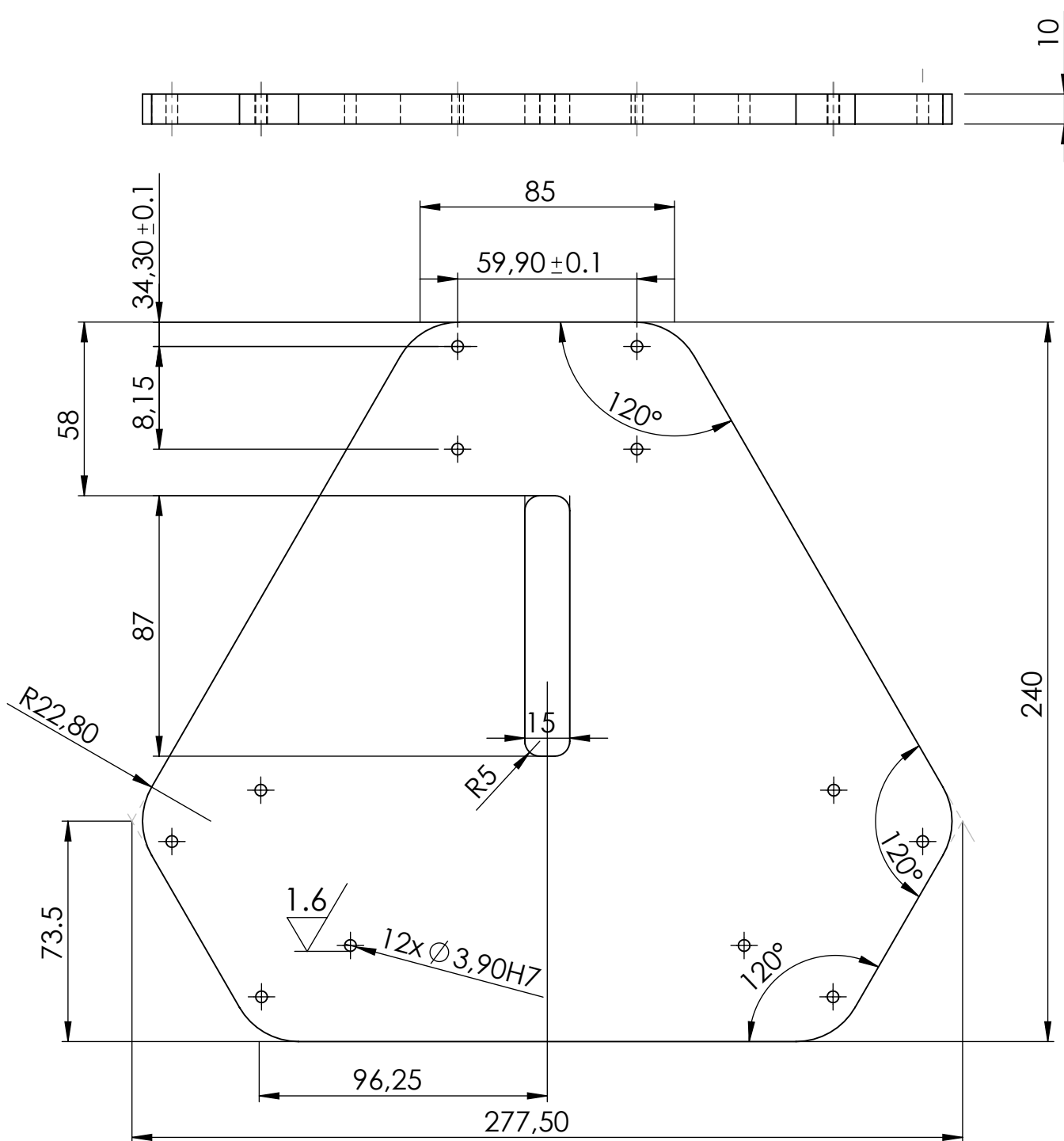


3.2 / (✓)



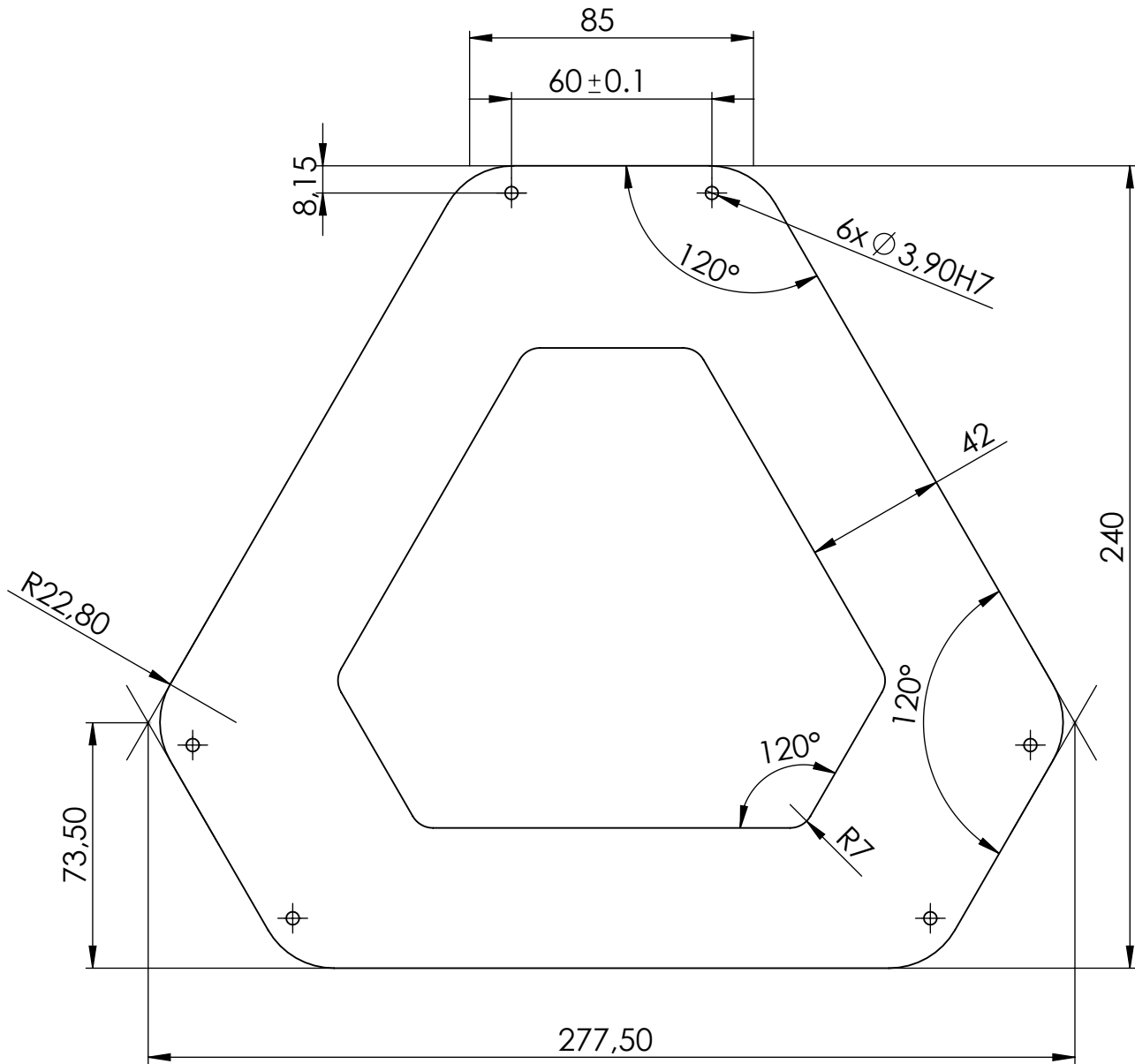
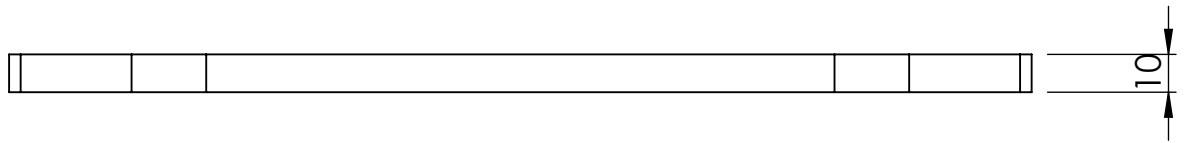
Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
NAVRHL									
PŘEZKOUSĚL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									
SolidWorks edice pro školství. Slouží jen pro instrukce.						Č. VÝKRESU		úchyt trysky 2	
HMOTNOST:						MĚŘÍTKO: 2:1		LIST 1 Z 1 LISTŮ	
								A4	



Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NÁZEV		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
NAVRHL									
PŘEZKOŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI									
SolidWorks edice pro školství. Slouží jen pro instrukce.						Č. VÝKRESU		spodní rám	
HMOTNOST:						MĚŘÍTKO:1:2		LIST 1 Z 1 LISTŮ	
								A4	

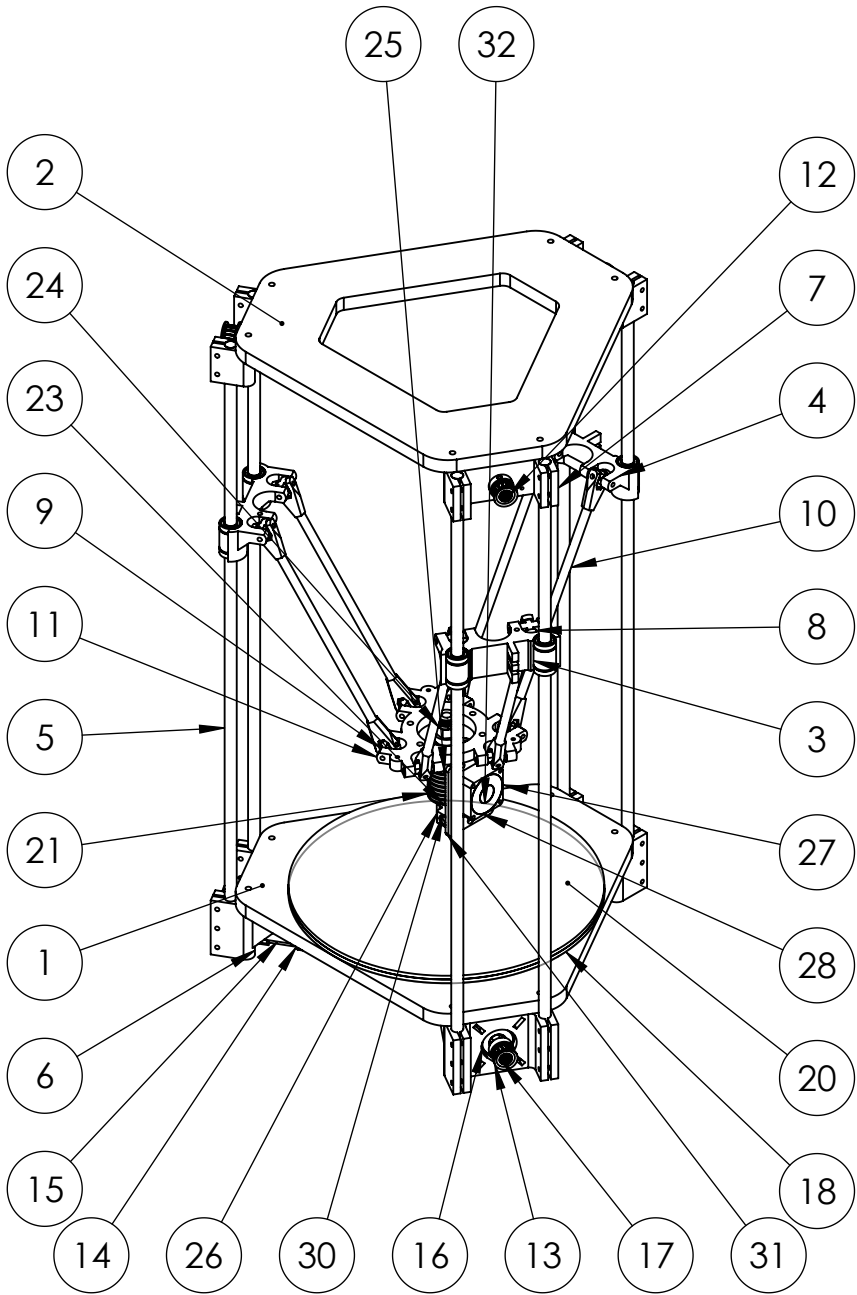


Netolerované rozměry ISO 2768

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:						OPRACOVÁNÍ:			ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY			NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU			ZMĚNA					
		NÁZEV		PODPIS		DATUM						NÁZEV:								
NAVRHL																				
PŘEZKOUSEL																				
SCHVÁLIL																				
VÝROBA																				
Z. JAKOSTI												Č. VÝKRESU			vrchní rám			A4		
												HMOTNOST:			MĚŘÍTKO:1:2			LIST 1 Z 1 LISTŮ		

**SolidWorks edice pro školství.  
Slouží jen pro instrukce.**

Č. POLOŽKY	NÁZEV DÍLU	Množství
1	spodní rám	1
2	horní rám	1
3	ložisko Ozak LM8UU	6
4	jezdec	3
5	tyč pilře	6
6	úchyty dole	3
7	úchyty nahoře	3
8	U kloub	12
9	kloub	12
10	tyčka ramene	6
11	střed tiskárny	1
12	střed pro ložisko	3
13	T5 ložisko řemenice	6
14	horní rám motoru NEMA 17	3
15	tělo motoru NEMA 17	3
16	spodní rám motoru NEMA 17	3
17	hřídel motoru NEMA 17	3
18	deska FR4	1
19	meandr mědi	1
20	skleněná deska	1
21	žebrované chlazení	1
22	"Heat Break" přechodová trubička	1
23	hrot trysky	1
24	vstupní část trysky	1
25	horní úchyt rámečku pro ventilátor	1
26	spodní úchyt rámečku pro ventilátor	1
27	šasi ventilátoru 30mm	1
28	rotor ventilátoru 30mm	1
29	úchyt trysky 1	1
30	topné tělísko	1
31	rámeček ventilátoru	1
32	střed rotoru "HUB"	1



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA		
NAVRHL		JMÉNO	PODPIS	DATUM			NÁZEV:			
PŘEZKOUSEL										
SCHVÁLIL										
VÝROBA										
Z. JAKOSTI					MATERIÁL:		Č. VÝKRESU		A3	
							sestava tiskárny			
					HMOTNOST:		MĚŘÍTKO:1:5		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

SolidWorks edice pro školství.  
Slouží jen pro instrukce.